



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE
HORMIGONES DE ALTAS RESISTENCIAS
FABRICADOS CON RESIDUOS MIXTOS Y
CERÁMICOS**

Treball realitzat per:

David Lafuerza Abel

Dirigit per:

Miren Etxeberria Larrañaga

Grau en:

Enginyeria de la Construcció

Barcelona, 23 de Gener de 2014

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE GRAU



AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a mi tutora Miren Etxeberria Larrañaga, por todo el esfuerzo vertido en mí y este proyecto. Gracias por guiarme y asesorarme en todo momento.

Muchas gracias a Jesús Manuel Fernández porque ha sido mi brazo derecho, ha sido quién ha estado a mi lado en todo el desarrollo de la tesina y me ha ayudado en todo momento. Mis más sinceras gracias.

También agradecer la colaboración de Dani Peran, Anna Galindo y Andreu González que me han ayudado en cuanto han podido.

Mis agradecimientos al equipo técnico del laboratorio del Departamento de Materiales y de Estructuras de la Escuela Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya, porque ha sido fundamental la ayuda y conocimiento de todos ellos.

Un agradecimiento muy especial a mi familia, sobretodo a mis padres y hermanas, con la que sin ellos no hubiera sido posible llegar hasta aquí. Gracias por estar a mi lado desde el primer día.

A mis amigos y novia, que siempre confiaron en mí.

A todos ellos, muchas gracias.



RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE PROPIEDADES DIFERIDAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

AUTOR: DAVID LAFUERZA ABEL

TUTORA: MIREN ETXEBERRIA LARRAÑAGA

Con este proyecto se pretende analizar las propiedades del hormigón de altas resistencias fabricado con árido reciclado, estudiando los beneficios que este estudio podría llevar para futuras ramas de investigación sobre una construcción sostenible y con sensibilización ambiental.

En primer lugar, se estudian las características del hormigón, buscando la máxima optimización de árido reciclado frente de árido natural calizo y sus repercusiones en las propiedades diferidas.

En segundo lugar, debido a las exposiciones tan plurales que pueden tener la aplicación de estos hormigones, se realizarán varios ensayos donde se podrá analizar detenidamente las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad. Ensayos de densidad, absorción, succión capilar, entre otros. O también resistencias a compresión, tracción o módulo elástico.

Por otro lado y recalcando la importancia de ello, lo que predomina en este proyecto es el estudio de las propiedades diferidas del hormigón y para ello se estudian fenómenos como las retracciones y el curado interno de los hormigones. Se harán con ensayos de retracción plástica, en sus primeras 24 horas y luego ensayos de retracción autógena y por secado en distintas fases de edad del hormigón endurecido. En este apartado se podrán analizar detalladamente las propiedades del hormigón en exposiciones adversas.

Se fabrican 9 tipos distintos de hormigón en cada uno de los ensayos realizados. El primero es un hormigón convencional, el segundo, tercero y cuarto con arena reciclada mixta en porcentajes de 10, 20 y 30 % en sustitución de arena natural caliza. El quinto, sexto y séptimo hormigón es de arena reciclada cerámica en porcentajes de 10, 20 y 30% en sustitución de arena natural caliza. Por último, el octavo y noveno hormigón será con gravilla reciclada en porcentajes del 15 y 30 % en sustitución de la gravilla natural caliza.

En todas las fabricaciones se utilizará un cemento tipo I 52.5 R, como adición cenizas volantes y con aditivo superplastificante para mejor trabajabilidad.



ABSTRACT

TITLE: DIFFERED PROPERTIES ANALYSIS OF RECYCLED CONCRETE

AUTHOR: DAVID LAFUERZA ABEL

TUTOR: MIREN ETXEBERRIA LARRAÑAGA

Through the realization of this project, it is pretended to analyze the properties of the high performance concrete with recycled aggregates, studying the benefits that this research could mean for future investigation branches about sustainable construction and with environmental sensitization.

First of all, the concrete characteristics are studied, trying to find the maximum optimization of recycled arid against limestone natural arid and its effect to the differed properties.

Secondly, due to the wide range of exposures that the application of these concretes may have, several tests will be realized to analyze carefully the physical, mechanical and durability properties. Among others, tests of density, absorption and wicking tests are done. Also, the compression and traction resistance or the elastic modulus.

On the other hand, and emphasizing its importance, what predominates in this project is the study of the concrete differed properties so some phenomena, such as shrinkage and the concrete internal curing, are studied. There will be plastic shrinkage tests during its 24 first hours and, later, autogenous and drying shrinkage at different times of the hardened concrete. In this chapter it will be possible to examine carefully the properties of the concrete at adverse exposures.

9 different kinds of concrete are fabricated in each test that has been realized. The first one is a conventional concrete. Second, third and fourth ones are made with mixed recycled sand by 10, 20 and 30% in substitution of limestone natural sand. Fifth, sixth and seventh ones are made with ceramic recycled sand by 10, 20 and 30%, also in substitution of limestone natural sand. Lastly, the eighth and ninth concretes are made with recycled gravel by 15 and 30% in substitution of the limestone natural gravel.

Cement type I 52.5 R will be used for all the fabrications, as well as additions of fly ash and a superplasticizer additive to improve its workability.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 ASPECTOS GENERALES.....	8
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	9
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESINA FINAL DE GRADO	9
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES (HAP)	12
2.2.1 Introducción	12
2.2.2 Dosificación i fabricación	12
2.2.3 Propiedades del hormigón de altas prestaciones	22
2.2.4 Retracción	23
2.3 HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS	26
2.3.1 Áridos reciclados	26
2.3.2. Dosificación y fabricación	26
CAPÍTULO 3: FASE EXPERIMENTAL.....	37
3.1 INTRODUCCIÓN	37
3.2 MATERIALES UTILIZADOS	38
3.2.1 Cemento	38



3.2.2 Cenizas Volantes.....	38
3.2.3 Aditivo.....	39
3.2.4 Agua	39
3.2.5 Áridos	39
3.3 FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES.....	45
3.3.1 Nomenclatura de las probetas.....	45
3.3.2 Dosificaciones	46
3.3.3 Llenado de probetas, compactación y conservación	49
3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	51
3.4.1 Propiedades del hormigón fresco	52
3.4.2 Propiedades del hormigón endurecido	55
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
4.1 INTRODUCCIÓN	68
4.2 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO	68
4.2.1 Densidad fresca.....	68
4.2.2 Retracción plástica	69
4.3 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	75
4.3.1 Propiedades físicas	75
4.3.2 Propiedades mecánicas	78
4.3.3 Propiedades de durabilidad.....	82
4.3.4 Retracciones.....	87
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	96
5.1 ÁRIDO.....	96
5.1.1 Árido natural	96
5.1.2 Árido reciclado.....	96



5.2 HORMIGÓN	96
5.2.1 Hormigón fresco	96
5.2.2 Hormigón endurecido	97
5.3 CONCLUSIONES GENERALES.....	100
5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	100
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	102



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS GENERALES

Es sabido que el hormigón es uno de los principales materiales utilizados en la construcción. Por este motivo y por el impacto medioambiental que tiene la extracción de materias primas, la solución puede ser fomentar la utilización de áridos reciclados en sustitución al árido natural. Además que esto repercutiría de forma positiva por la optimización de costes que esta práctica produciría.

Debido a la falta de estudios y la desconfianza en el uso de materiales reciclados, su uso se restringe a usos que reclamen poca resistencia, como rellenos, capas de cobertura para vertederos o pistas provisionales en obras constructivas para el paso de vehículos.

Este estudio quiere investigar el comportamiento de los hormigones con altas prestaciones fabricados con árido reciclado, así como profundizar en la búsqueda de resultados efectivos.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es analizar la influencia que tiene la sustitución de árido natural por árido reciclado en distintos porcentajes en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad, así como las retracciones a distintas edades del hormigón de altas prestaciones.

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Validar la calidad de los áridos reciclados para poderlos utilizar en la fabricación de los hormigones.
- Cuantificar el porcentaje máximo de sustitución óptimo de árido natural por el árido reciclado para que los hormigones resultantes puedan ser comparables al hormigón convencional.
- Comparar los resultados de los hormigones con los distintos tipos de áridos reciclados.



- Comparar las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones con árido reciclado con respecto al hormigón convencional.

1.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El primer paso que se debe hacer en todo estudio científico es la búsqueda de información de los trabajos relacionados con el tema que se quiere estudiar. Se consultaron monografías, estudios, así como artículos editados por revistas científicas de orden internacional. También todas las normas de los ensayos a que se sometieron las probetas.

El presente estudio se centra en las propiedades del hormigón con árido reciclado. Para ello se han fabricado hormigones con diferentes porcentajes de áridos reciclados y con distinción entre árido grueso y árido fino. En todos los hormigones se le ha añadido una adición de cenizas volantes

Antes de la fabricación de los hormigones se realizaron trabajos experimentales para la caracterización tanto física como química de todos los materiales utilizados siguiendo las normas pertinentes. Después se calcularon las dosificaciones de los hormigones empleando criterios de hormigones de altas prestaciones.

Una vez fabricados los hormigones, se les ha aplicado distintos ensayos para analizar las propiedades físicas y mecánicas y propiedades de durabilidad, así como retracciones.

Los resultados extraídos de los ensayos se han recogido y ordenado. Se han procesado y se han analizado a partir de las conclusiones deseadas según los objetivos establecidos por el estudio.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESINA FINAL DE GRADO

La estructura de la tesina final de grado se divide en cinco capítulos principales:

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo se detallan los principales aspectos de estudio de la presente tesina, se explica la metodología seguida en todo el estudio y se plantean los objetivos a llevar a término.



ESTADO DEL ARTE

Se introducen toda información y estudios conocidos hasta el momento del tema de estudio y se describen las investigaciones realizadas, así como los resultados que se han obtenido. Esto nos sirve para tener una guía a lo largo de toda la fase experimental.

FASE EXPERIMENTAL

En esta fase se detallan las características de todos los materiales utilizados a lo largo de todo el estudio. Se explica el proceso de fabricación y los ensayos de caracterización a los que se han sometido los hormigones.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizan las propiedades físicas, mecánicas, de durabilidad con especial interés en las retracciones del hormigón para cada uno de los ensayos. Se analizan, se comparan y se extraen conclusiones.

CONCLUSIONES

En este apartado se recogen todas las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados y se exponen de manera sintética.



CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se aporta el conocimiento científico sobre la utilización de materiales alternativos como componentes de materiales constructivos utilizados en obras civiles. Los materiales sostenibles utilizados en esta tesina son el árido fino reciclado mixto y árido fino cerámico en sustitución a la arena natural calizo.

El uso de hormigones con áridos reciclados en la construcción se está extendiendo cada vez más. La menor extracción de materias primas, el coste menor en el transporte si se consigue aplicar el árido reciclado en el emplazamiento donde se obtiene, la reducción del impacto ambiental pero sobretodos el rápido agotamiento de las reservas de los áridos naturales convencionales han requerido su uso.

Los áridos reciclados son el producto resultante del tratamiento de los RCD, que cumpliendo con la normativa técnica de aplicación, constituyen una alternativa de empleo de los áridos naturales.

Entendemos como árido reciclado el material inorgánico que se ha obtenido proveniente de demoliciones o residuos de construcción en general [1]. Se pueden clasificar en función de la naturaleza de los residuos de origen como: áridos procedentes de hormigón, áridos reciclados cerámicos y áridos reciclados mixtos.

En esta tesina, como ya se ha dicho, se ha trabajado con los dos últimos grupos de tipos de áridos. Tal y como se describe en el capítulo anterior, se estudió la aplicabilidad y el análisis de los efectos positivos que podrían causar la utilización de arenas recicladas en sustitución a la arena natural en las propiedades de los hormigones de altas prestaciones.

En este capítulo primero se describe las propiedades, en general, de los hormigones de altas prestaciones y después las propiedades de los hormigones fabricados con áridos reciclados.



2.2 HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES (HAP)

2.2.1 Introducción

Aunque los hormigones de altas prestaciones son a menudo considerados como un material relativamente nuevo, este se ha ido desarrollando gradualmente durante los años. En el año 1950, hormigones con fuerza a compresión de 34 MPa era considerado como de alta resistencia. En los años 60 subió esta definición de hormigones de altas resistencias o prestaciones a hormigones con fuerzas de compresión de 41 a 52 MPa. En los años 70 hablábamos de fuerzas de 62 MPa. Recientemente, estamos en los valores de 138 MPa [2].

Durante muchos años fue difícil conseguir resistencias a compresión superiores a 41 MPa. Sin embargo, recientemente, la aplicación de hormigones de alta resistencia se ha visto incrementada y son usados en muchas partes del mundo. El aumento se puede deber al desarrollo de la tecnología en los materiales y la demanda de este tipo de hormigones. Para poner un ejemplo, la construcción de un centro comercial en Chicago como el “Chicago’s Water Towel Place” en el año 1976 y el mítico rascacielos “311 South Wacker Drive”, en el año 1990, el decimosexto más alto de Estados Unidos, fueron construidos con hormigones de altas prestaciones [2].

Se tratan de hormigones de muy alta compacidad. Como consecuencia de esta característica se consigue que las prestaciones de estos hormigones mejoren en diferentes aspectos, como por ejemplo: el comportamiento mecánico, la resistencia a compresión, resistencia a tracción, resistencia al esfuerzo cortante y la resistencia por abrasión. También se ve mejorada la durabilidad, con propiedades de permeabilidad, desecación y fisuración, carbonatación, corrosión de armaduras, resistencia química y resistencia a las heladas. También se puede mejorar el diseño, influyendo en la esbeltez, mayores luces en construcciones y la reducción del peso propio [3].

2.2.2 Dosificación i fabricación

2.2.2.1 Materiales

La producción de hormigones de altas resistencias, requiere que constantemente se pasen rigurosos requisitos de viabilidad, y se requieren materiales con extensos controles de



calidad. Se necesita calidad en los materiales y extensas especificaciones de aplicabilidad. Los hormigones de altas resistencias se han producido usando materiales de calidad, basados en resultados de investigaciones. [4]

Cemento

La elección del cemento para hormigones de altas resistencias es muy importante. Los efectos de las características del cemento en la demanda de agua es más notable en hormigones de altas prestaciones ya que contiene una mayor cantidad de cemento debido a relaciones agua/cemento bajas [4].

En los hormigones de altas prestaciones, al tener altos contenidos de cemento, implicará también un aumento de la temperatura dentro del hormigón. Esto no es un problema, ya que en 6 días se disipa el calor, sin efectos perjudiciales en el hormigón.

Sin embargo, si se prevé que en el ambiente de la fabricación el aumento de calor pueda ser un problema, se pueden utilizar cementos de tipo II con bajo calor de hidratación, siempre y cuando se cumplan los requisitos de resistencias mínimas.

El cemento a emplear debe proporcionar elevada resistencia mecánica con la finalidad de conseguir una pasta de elevadas prestaciones. Generalmente se utilizan CEM I-52.5R o CEM I-42.5R. En la elección del cemento se tiene que tener en cuenta que son preferibles los que dan lugar a una baja demanda de agua y tienen un menor contenido de aluminato tricálcico. Esto se puede ver en la tabla A.4.2 del Anejo 4 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [4].

La dosificación de cemento estará comprendida entre 380 y 500 Kg/m³, en función del empleo y tipo de adición, de la resistencia final requerida y de la demanda de resistencia inicial [5].

Aditivo súper plastificante

Este tipo de aditivos en hormigones de altas resistencias tiene como finalidad aumentar la resistencia manteniendo la consistencia del hormigón, o manteniendo la resistencia, tener una consistencia más líquida y por lo tanto más trabajable [4].



Este aditivo debe quedar de forma homogénea en toda la masa de hormigón. Sólo de esta manera podremos sacarle la máxima efectividad al aditivo. Por este motivo, el uso debe ser supervisado en todo momento [4].

El empleo de súper plastificantes es imprescindible para obtener trabajabilidades aceptables con relaciones agua/cemento mencionadas en el artículo 29 de la EHE-08. Se utilizan súper plastificantes que permiten reducir hasta un 30% o más del agua de amasado, manteniendo la consistencia requerida. Los mejores resultados se obtienen con los aditivos basados en éter policarboxílico.

La dosificación de aditivo acostumbra a ser elevada debido a que debe reducirse una importante proporción de agua de amasado y a su vez fluidificar hasta la consistencia deseada.

En función de la demanda de la resistencia requerida o en caso contrario del mantenimiento de consistencia requerido, siempre en relación con las características de los materiales empleados así como de las condiciones ambientales, deberá seleccionarse el aditivo súper plastificante adecuado en función de sus propiedades. Igualmente, no es recomendable utilizar aditivos basados en lignosulfonatos, ya que a grandes dosis tienen un efecto retardante [2].

Adiciones

Las adiciones son minerales finamente divididos, que consisten principalmente en cenizas volantes y humo de sílice y cemento de escoria. Estos han sido ampliamente utilizados en hormigones de altas resistencias [4].

Cenizas volantes

Las cenizas volantes son un subproducto industrial con una continua tendencia al alza. De este residuo, 210 kt se produjeron en 2010 solamente en España y de todo el excedente de cenizas volantes, solamente se usa el 10% aproximadamente, acumulándose las restantes en grandes cantidades en espacios aprovechables para otros usos [6].

Su principal utilidad, en el campo de la construcción, es en calidad de adición al hormigón como sustituto del cemento. Este uso está limitado por la Normativa Internacional a un tamaño máximo, expresado en un determinado % retenido en el tamiz 45 μm . Esta

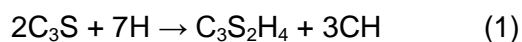


limitación se justifica, a haberse encontrado una relación entre este porcentaje y la resistencia a compresión alcanzada por el hormigón, en especial a edades tempranas. Esta situación, impone el estudio de la posible utilización de las cenizas volantes consideradas no aptas para sustituir al cemento, para otros fines, y en otros sectores de la industria de la construcción, como la cerámica y la prefabricación de piezas de hormigón. Estas industrias desarrollan unos procesos de fabricación que favorecerían su aplicación.

En este sentido, en el proceso de prefabricación de piezas de hormigón es práctica usual el sometimiento de la pieza a curados con incorporación de calor, bajo el objeto de conseguir a edades tempranas las resistencias necesarias para la manipulación de piezas. Esto puede resultar beneficioso para la mejora de resistencias a cortas edades en hormigones con cenizas volantes.

De esta manera, al mismo tiempo que se profundiza en el estudio de un sistema constructivo, que debido a sus reconocidas ventajas: resistencia, facilidad de fabricación, versatilidad, etc, se muestra apropiado para ciertas construcciones (prefabricados, viviendas bajas...), se contribuye a la solución del problema ecológico que supone el almacenamiento de este subproducto industrial.

En los hormigones con adición de cenizas volantes ocurren dos reacciones principales. En la primera se produce gel C-S-H ($C_3S_2H_4$) y portlandita (hidróxido cálcico) por la hidratación del cemento Pórtland, ecuación (1). En la segunda, la portlandita se combina con las cenizas volantes (CV) para formar nuevos geles de C-S-H, ecuación (2). El resultado suele traducirse en un hormigón de mejores propiedades físicas y mecánicas.



En la actualidad la incorporación de cenizas está condicionada por el tipo de cemento disponible en el mercado, en vez de condicionar el tipo de cemento a las cenizas disponibles. Esto resulta en especificaciones diseñadas para que las cenizas se ajusten a los cementos que están disponibles en el mercado. Para explotar adecuadamente las cenizas volantes que provee la industria, el cemento debería ser formulado para optimizar la actuación de la combinación en términos de consistencia, resistencia y durabilidad de los hormigones.



De experimentos ya realizados se ha podido llegar a la conclusión de que las cenizas volantes pueden contribuir a mejorar la resistencia a compresión a edades tempranas como los 28 días [7].

La eficacia de la adición de ceniza frente a la penetración de carbonatos depende del contenido libre de portlandita. Siendo más efectiva la adición cuanto mayor sea el contenido de portlandita libre. Asimismo, la penetración del ion cloruro se reduce por el uso de cenizas volantes. La eficacia de la ceniza frente al avance de cloruros está asociada a las reducciones de porosidad producidas por la adición [7].

El comportamiento de los hormigones con cenizas volantes varía en función de las características físicas y químicas de los cementos empleados, a pesar de que éstos estén catalogados bajo la misma designación de cementos comunes [7].

Humo de sílice

El humo de sílice y las mezclas que contienen humo de sílice se han utilizado en hormigones de alta resistencia para los propósitos estructurales y para aplicaciones de superficie y como materiales de reparación en situaciones donde la abrasión y la baja permeabilidad son ventajosas [4].

La distribución del tamaño de partícula de un humo de sílice típica, muestra la mayoría de partículas a ser menor que una micra con un diámetro medio de aproximadamente 0.1 micras, aproximadamente 100 veces más pequeña que las partículas promedio de cemento [4].

El humo de sílice, debido a su extrema finura y gran contenido de sílice, es un material puzolánico altamente eficaz. El humo de sílice reacciona con la cal puzolánica durante la hidratación del cemento para formar hidrato de silicato de calcio (CSH) [4].

Áridos

Tanto los áridos finos como los gruesos utilizados para hormigones de altas resistencias deberían, como mínimo, cumplir los requisitos de la norma ASTM C 33.

Muchos estudios han demostrado que para la resistencia a compresión óptima con alto contenido de cemento y bajas relaciones agua/cemento, el tamaño máximo del árido grueso



debe ser de entre 9.5 y 12.7 mm., ya que los aumentos de resistencia fueron causados por la reducción de la tensión media de enlace debido a la mayor área de superficie del árido.

Muchos estudios han demostrado que la piedra triturada produce resistencias más altas que la grava redondeada. La razón más probable de esto es la mayor unión mecánica que puede desarrollarse con partículas angulares. Sin embargo, la angulosidad acentuada se debe evitar, debido a la alta demanda de agua auxiliar y menor trabajabilidad [4].

Si los áridos son de alta capacidad de absorción, éstos actúan como pequeños depósitos de agua distribuidos por todo el hormigón, proporcionando agua en el curado del hormigón, hecho beneficioso en las pastas de bajas relaciones agua/cemento.

Varios investigadores han encontrado que, para algunos áridos, se alcanza un punto más allá del cual nuevos aumentos del contenido de cemento no producen ningún aumento en la resistencia a compresión del hormigón, ya que se llega al límite del potencial de unión entre el cemento y el árido [4].

Árido fino

En general se utilizan arenas naturales lavadas, con bajo contenido en finos, aunque las arenas de machaqueo también pueden ser utilizadas.

Arenas de mala calidad pueden incrementar la demanda de agua y reducir así las prestaciones del hormigón a corto y largo plazo. En consecuencia, deben presentar un grado de pureza muy elevado.

En cualquier caso, las arenas utilizadas deberán cumplir con las exigencias descritas en la EHE-08 Artículo 28 [5].

Árido grueso

Su resistencia no debe ser inferior a la que caracterizará la pasta o, por defecto, a la especificada para el hormigón en cuestión. Para ello, su selección debe ser cuidadosa, como indica el Artículo 28 de la EHE-08.



2.2.2.2 Dosificación del hormigón

La dosificación de los hormigones de altas resistencias es un proceso más crítico que las dosificaciones de hormigones de resistencias normales. Por lo general, se emplean aditivos puzolánicos y químicos especialmente seleccionados y, como ya se ha comentado, se debe lograr una relación agua/cemento bajas [4].

Relación agua/cemento

Contenidos de cemento altos y bajos contenidos de agua producen resistencias más altas. Dosificaciones mayores de cemento también implican mayor demanda de agua en la mezcla. Como se ha dicho, tampoco por más contenido de cemento que se añada implica mayores resistencias a compresión.

Por supuesto, el asentamiento del hormigón se relaciona con la proporción de agua/cemento y la cantidad total de agua en el hormigón.

Proporciones en agua de cemento en peso para hormigones de alta resistencia han sido habitualmente de 0.27-0.5. La cantidad de aditivos líquidos, en particular los reductores de agua de alto rango, a veces se ha incluido en las relaciones de agua/cemento.

Proporción de áridos

En las dosificaciones de hormigones de altas resistencias, los áridos han tenido una gran importancia ya que ocupan el mayor volumen de cualquiera de los ingredientes en el hormigón. Por lo general, los hormigones de altas resistencias han sido producidos utilizando áridos de peso normal.

2.2.2.3 Curado

El curado del hormigón es el proceso de mantenimiento de un contenido de humedad satisfactoria y una temperatura favorable en el hormigón durante el período de hidratación de los materiales de cemento de modo que las propiedades deseadas del hormigón se puedan desarrollar. El curado es esencial en la producción de la calidad del hormigón y es crítico en los



HAR. La fuerza potencial y la durabilidad del hormigón se desarrollan plenamente sólo si el curado es adecuado durante un período antes de su puesta en servicio.

El curado es importante en hormigones de altas resistencias. Para producir una pasta de cemento con el mayor contenido de sólidos posible, el hormigón debe tener el contenido mínimo de agua. Sin embargo, una vez el hormigón está en la puesta en obra y la estructura de la pasta está estable, el agua debe ser de libre acceso, sobre todo durante las primeras etapas de hidratación. En este período, una gran cantidad de agua reacciona con el cemento. Una vez se han completado todas las reacciones químicas, el agua pierde un cuarto de su volumen. Cualquier exceso de agua que entre en la estructura, aumentará la reacción de hidratación, y por lo tanto, el porcentaje de sólidos por unidad de volumen de la pasta, aumentando así su fuerza [4].

En relaciones de agua/cemento por debajo de 0.4, el último grado de hidratación se reduce significativamente si no se proporciona agua libre. El curado con agua en los áridos permitirá completar de una manera más eficiente la hidratación del cemento.

Según los estudios de Hugo Costa, Eduardo Júlio y Jorge Lourenço [8], la reciente producción de áridos ligeros con altas resistencias mecánicas, asociada con el uso más eficiente de súper plastificantes de tercera generación, permitieron el desarrollo de HPC con áridos ligeros [9].

Con densidades de entre 1,500 y 2000 kg/m³, es posible producir HPC con áridos ligeros con fuerzas de compresión variando entre 40 y 90 MPa [10]. La alta resistencia se consigue con relaciones de agua/cemento más baja, término que ya nos hemos referido con anterioridad. También se tiene que tener en cuenta las adiciones puzolánicas, como por ejemplo el humo de sílice [11].

Sin embargo, debido a la mayor sensibilidad del secado de la matriz de unión del hormigón, estas opciones conducen a una mayor contracción de HPC, y por lo tanto conduce a un mayor riesgo de agrietamiento a edad temprana [12-16].

Diferentes estudios, [17-23] demostraron que la contracción de HPC con áridos ligeros suele ser inferiores que los HPC con áridos naturales. Esto pasa cuando el árido está saturado, ya que un eficiente curado interno es promovido por una hidratación ininterrumpida de la pasta de unión, como resultado de un flujo continuo de la humedad del árido ligero, almacenado en



su estructura interna alveolar, evitando un secado propio, causando, como se ha comentado, problemas de agrietamientos [9, 18, 19, 24, 25] Esto da lugar a deformaciones autógenas [19, 21, 23], por lo que se reduce la contracción total.

También se ve reducida la permeabilidad entre la matriz de unión del hormigón y el árido ligero [9, 26].

A pesar de la mejora del curado interno de los HPC con áridos ligeros, hay un riesgo de agrietamiento superficial a edades tempranas debido a la contracción diferencial entre la matriz del mortero y el interior del elemento del hormigón.

La eficiencia del curado interno y la reducción de la contracción de HPC con árido ligero están influenciadas por varios factores. La dosificación en los áridos ligeros, el grado de saturación del árido, el tamaño de las partículas, tipo de cemento y las adiciones, igual que la edad de inicio de secado [20, 22, 24].

Objetivos y métodos del curado

Los objetivos del curado son evitar la pérdida de humedad y controlar la temperatura del hormigón durante el período de tiempo necesario para alcanzar los niveles óptimos de resistencia.

Los métodos del curado dependen de cómo es mantenida la humedad del hormigón.

Los métodos que suministran humedad adicional a la superficie del hormigón durante el periodo inicial de endurecimiento. Estos incluyen la inundación o la inmersión, el rociado o pulverización y el uso de cubiertas húmedas. Estos métodos por efecto de la evaporación, proporciona cierto grado de enfriamiento, que es beneficioso en ambientes calurosos.

Éste es un método eficiente para evitar pérdidas de humedad en el hormigón y este tipo de curado es efectivo para mantener el hormigón a una temperatura uniforme. La temperatura no puede estar a más de unos 11°C por debajo de la del hormigón para prevenir tensiones de origen térmico, que podrían figurarlo. Éste método necesita bastante supervisión y mano de obra, no resulta demasiado práctico, excepto para pequeñas obras.



Los métodos que impiden la pérdida de humedad mediante el sellado o impermeabilización de la superficie del hormigón. Esto puede conseguirse con papel impermeable, películas plásticas, etc [27].

El rociado o pulverización con agua es un excelente método de curado cuando la temperatura está encima de la de congelación. Con distintos medios se puede aplicar una fina pulverización de agua que puede aplicarse de forma continua por medio de un sistema de picos o una barra regadora.

Una desventaja del rociado es su coste. Es adecuado un suministro de agua continuo sin ciclos de secado para evitar agrietamientos.

También tenemos métodos que aceleran el endurecimiento del hormigón, suministrándole calor y humedad. Esto se lleva a cabo mediante vapor vivo o resistencias eléctricas.

Con un buen curado podemos alcanzar obtener un nivel de permeabilidad bajo, lo que nos permite proteger contra efectos corrosivos, disminuimos la fisuración y la porosidad y en definitiva aumentamos considerablemente la durabilidad de la estructura de hormigón.

Es el conjunto de operaciones necesarias para evitar la evaporación o la pérdida de agua de amasado del hormigón. Deberá realizarse manteniendo húmedas las superficies de los elementos hormigonados desde el primer momento de su colocación y prolongarse como mínimo 7 días.

El curado mediante agua deberá seguir las exigencias del Artículo 27 de la EHE-08 referente a la calidad de agua empleada.

Para el curado podrán emplearse agentes filmógenos. La extensión del líquido de curado se realizará mediante pulverizador, brocha, cepillo o rodillo procurando dejar una película fina y continua.

Los procedimientos de curado se describen en el Artículo 71.6 de la EHE-08.



2.2.3 Propiedades del hormigón de altas prestaciones

2.2.3.1 Densidad

Los valores medios de la densidad de los hormigones de alta resistencia son ligeramente superiores a los hormigones normales con los mismos materiales [4].

2.2.3.2 Resistencia a compresión

Los hormigones de altas resistencias muestran una mayor resistencia inicial comparado con los hormigones normales. Pero a mayores edades la diferencia no es muy significativa. Esta alta resistencia inicial es causada por un aumento en la temperatura de curado interno en las probetas de hormigón debido a una mayor calor de hidratación y la distancia más corta entre las partículas hidratadas en el hormigón de alta resistencia debido a la baja relación agua/ cemento [4].

2.2.3.3 Módulo de elasticidad

Con la información disponible, el coeficiente de Poisson del hormigón de alta resistencia en el rango elástico parece comparable a la del rango esperado de valores para hormigones de baja resistencia. El módulo de elasticidad depende altamente de las propiedades y de las proporciones del árido grueso utilizado.

2.2.3.4 Resistencia a tracción indirecta

Dewar [28] estudió la relación entre la fuerza a tracción indirecta y la resistencia a compresión de los hormigones que tienen resistencias a compresión de hasta 84 MPa a los 28 días. Se llegó a la conclusión de que en bajas resistencias, la resistencia a la tracción indirecta puede ser tan alta como el 10% de la resistencia a la compresión.

Evolución del calor de hidratación

El aumento de la temperatura dentro del hormigón debido a la hidratación depende del contenido de cemento, de la relación agua/cemento, el tamaño de las partículas, la temperatura ambiente, etc.

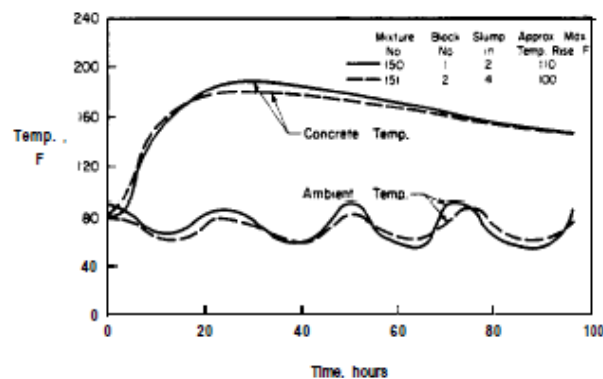


Figura 1. Gráfico que muestra la variación de temperatura de probetas de hormigón en el tiempo [28].

2.2.4 Retracción

Hay poca información disponible sobre el comportamiento de retracción del hormigón de altas resistencias. Si que se sabe que hay poca diferencia entre la retracción de hormigones de altas resistencias y el de bajas resistencias con áridos naturales calizos.

Por eso, la retracción es un tema que ha preocupado mucho y cuyo avance ha estado en multitud de estudios. Esta consiste en una propiedad reológica del hormigón que se traduce en una disminución, de carácter atencional, de las dimensiones de un elemento en el tiempo. Su efecto se manifiesta a través de varios mecanismos, pudiendo distinguir distintos tipos de retracción. Estos dependen de la composición del hormigón y de las condiciones ambientales.

La contracción no se ha visto afectada por los cambios de relación agua/cemento, pero es aproximadamente proporcional al porcentaje de agua en volumen de hormigón. Investigadores han concluido que la retracción de HAR que contienen reductores de agua era menor que la retracción de hormigones de bajas resistencias [4].

La retracción y la fluencia en hormigones de alta resistencia han resultado ser temas de extenso debate, es por este motivo que debido a la mayor capacidad de absorción de los áridos reciclados, los estudios de hormigón reciclado de altas prestaciones presentan generalmente evaluaciones de fluencia y retracción. Su posible uso en algunos elementos de hormigón estructural propenso a deformaciones requiere algunas consideraciones especiales respecto a estas propiedades.

Generalmente, la fluencia y la retracción incrementan a la vez que aumentan la sustitución del árido natural del hormigón [29]. Esto es debido tanto a la mayor proporción de



cemento en el hormigón RCA y de la baja relación a/c de la mezcla como de la presencia de mortero adherido al árido natural. Limbachiya [29] observó que el efecto de la retracción era más acentuado en su trabajo ya que aumentaba el contenido del cemento para conseguir iguales resistencias a 28 días.

En el hormigón endurecido la reducción de volumen experimentada se produce por la suma de la retracción térmica, la retracción por secado y la retracción autógena.

2.2.4.1 Retracción plástica

Como es conocido la retracción plástica tiene lugar en el hormigón fresco. Las deformaciones que provoca son consecuencia de la pérdida de agua al ambiente. En hormigones convencionales, la exudación del exceso de agua en la mezcla compensa esta pérdida de humedad y, si las temperaturas no son muy altas y el curado es adecuado, no provoca fisuras o deformación. En hormigones de altas resistencias y con bajas relaciones agua/cemento, no existe dicho exceso de agua por lo que la retracción plástica se debe tener en especial muy en cuenta.

Según José Mora-Ruacho, Ravindra Gettu y Antonio Aguado [30] el hormigón fresco expuesto a altas tasas de evaporación es propenso al agrietamiento y a las fisuras por la retracción plástica, especialmente en estructuras con grandes relaciones superficie/volumen. La investigación muestra que la reducción de la superficie de tensión del agua de mezcla es una manera eficaz para la disminución de tales fisuras. En la investigación hormigones convencionales de altas resistencias con súper plastificante y aditivos reductores de retracción fueron expuestos a secado en el estudio plástico. La monitorización continua del desplazamiento de la superficie facilitó la identificación de las diferentes etapas del agrietamiento por retracción plástica. El estudio concluye mostrando la eficiencia de aditivos reductores de retracción en la reducción de los agrietamientos por retracción plástica, incluso en HAR.

2.2.4.2 Retracción por secado

La necesidad de una trabajabilidad adecuada para facilitar la puesta en obra y consolidación del hormigón, necesita el uso de cantidades de agua en la mezcla mayores a las necesarias para el proceso de hidratación. La pérdida de parte de ese exceso de agua a la



matriz del hormigón una vez ya endurecido, provoca su reducción de volumen. A este fenómeno se le conoce como retracción por secado.

Es conocido que a bajas relaciones agua/cemento, la retracción por secado es menor [31].

Tal y como dicen los autores Jianyong Li y Yan Yao [32] y B. Persson [33], la retracción por secado de los hormigones de altas prestaciones a cortas edades está relacionada con la edad y pérdida de peso. La contracción total se relaciona con la edad, la relación a/c y el tipo y contenido de humo de sílice.

Los investigadores [32] remarcan que con el uso de cenizas volantes, escorias de altos hornos o humo de sílice, la retracción por secado se ven mejoradas, ya que llenan pequeños poros perjudiciales para la estructura del hormigón.

2.2.4.3 Retracción autógena

La retracción autógena es cualquier tipo de retracción independientemente de las pérdidas externas de agua, asociadas a una pérdida de peso, o a cambios de temperatura.

En primer lugar son la consecuencia de reacciones químicas entre el cemento y el agua que conducen a un producto con un volumen menor que los reactivos, provocando una deformación en la pasta hidratada de cemento.

En segundo lugar, en hormigones con baja cantidades de agua y con microestructuras densas e impermeables, [33] el agotamiento del agua libre debido a la hidratación del cemento produce humedades internas bajas, hasta un 70% en ambientes con humedad relativa del 100%, durante las primeras edades, lo cual es consecuencia posterior de una reducción del volumen significativas en hormigones de altas prestaciones.

Al querer trabajar con relaciones de agua/cemento bajas, puede incurrir en el error de posible aumento de la retracción autógena [31] ya que no tiene agua suficiente como para completar la reacción con el cemento.

Los investigadores [27] experimentaron a cortas edades la contracción autógena de alta resistencia en hormigones que contenían humo de sílice. La influencia en condiciones de secado en la hidratación de los materiales en el hormigón de alta resistencia con relaciones de agua/cemento de 0.25, 0.35 y 0.45, se evaluó basándose en el contenido de agua unida, que



se expuso a edades de 0.5, 1 y 3 días. Los resultados mostraron que el porcentaje de contracción autógena era macroscópica 50-20% basada en el presente método y por 70-30% basado en el principio de superposición convencional.

2.3 HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

2.3.1 Áridos reciclados

Los tipos de áridos pueden clasificarse según su composición en áridos reciclados de hormigón, cerámico o mixto; se analizan a continuación los usados en esta tesina; los áridos mixtos y los cerámicos.

2.3.1.1 Árido reciclado mixto

En el caso de la normativa Holandesa; define como árido el que contiene un porcentaje de hormigón del 50% con una densidad seca superior a 2100Kg/m³ y no más de 50% de materiales pétreos reciclados de diferente naturaleza, como es el caso del material cerámico con una densidad seca superior a 1600Kg/m³ [34].

2.3.1.2 Árido reciclado cerámico

Árido que se obtiene de procesar residuos con presencia predominante de material cerámico, el 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a 1600Kg/m³ para evitar que los materiales sean excesivamente porosos y ligeros [34].

2.3.2. Dosificación y fabricación

2.3.2.1 Materiales

Para la fabricación de hormigones con áridos reciclados, se utilizan los mismos tipos de cementos asignados en los hormigones de altas resistencias.



Limbachiya [35] utilizó cemento Portland con una resistencia característica de 42.5 MPa. Mientras que los autores [3, 36] utilizaron cemento tipo I 52.5 con adiciones de humo de sílice, cenizas volantes y escorias de altos hornos.

Limbachiya [35] escogió elementos prefabricados de hormigón estructural reciclado para producir RCA, por su disponibilidad en grandes cantidades y sus características mecánicas adecuadas para el uso en la producción de hormigón de altas resistencias. Además, estos elementos eran limpios y libres de impurezas químicas perjudiciales y otros componentes nocivos.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz [36] aplicaron a la fabricación de hormigón áridos finos y gruesos triturados procedentes de hormigones convencionales con resistencias características entre 35-70 MPa.

La idoneidad de los áridos reciclados cerámicos para su uso en diferentes aplicaciones ha sido extensamente investigado por muchos autores [37-44]. La mayor parte de las publicaciones de investigación han estudiado su uso con árido fino o grueso, pero también se ha estudiado su aplicación como adiciones al cemento [45,46]. Se establecieron los métodos de dosificación y las tasas de sustitución del árido natural considerando el tamaño nominal máximo de las partículas cerámicas para lograr buenas propiedades del hormigón fresco y endurecido. Pocos autores [47,45] sugirieron que el uso de áridos reciclados podría mejorar el HPC, ofreciendo un valor adicional a los áridos cerámicos.

2.3.2.2 Fabricación

El diseño de las dosificaciones de hormigón con árido reciclado, sea por resistencias moderadas o altas, es muy similar al procedimiento seguido por el hormigón con árido natural. Tal y como se hace habitualmente con el hormigón reciclado, las correcciones con el contenido de agua son necesarias para obtener una trabajabilidad adecuada en el hormigón reciclado de altas prestaciones, pero los cambios de proporción agua/cemento hace falta que sean relativamente pequeñas para no afectar a la resistencia.

El método utilizado en el estudio de Limbachiya [35], tenía presente el efecto de los RCA en la resistencia del hormigón. Se trataba de un método simple y que podía ser integrado dentro de los actuales procedimientos de mezcla y diseño de hormigón a nivel industrial. Reconocían, para el caso del método de diseño de hormigón reciclado según las resistencias



finales, la necesidad de configurar particular y periódicamente los datos de dosificación debido a las características propias de los distintos materiales reciclados y ajustar las cantidades establecidas en posteridad.

De acuerdo a los investigadores Gomes y de Brito [48], el proceso de mezclado puede influir, obteniendo adecuadas propiedades cuando se la cantidad de agua se incorpora en dos fases separadas en el tiempo dejando que la pasta de cemento envuelva mejor los áridos reciclados, rellenando las fisuras y los poros presentes en los áridos reciclados.

Las relaciones agua/cemento más utilizadas para el hormigón reciclado de altas prestaciones se encuentran situadas al intervalo 0.29-0.45. Tu y Chen [3] optaron por tres ratios de agua/cemento: 0.32; 0.36 y 0.4, pero con el mismo contenido de agua de 160 Kg/m³ para las dosificaciones diseñadas para cada grupo.

En resumen, ha sido un objetivo para la obtención de hormigones compactos, característica necesaria para alcanzar buenas resistencias mecánicas y durabilidad, la disminución de la relación agua/cemento, hasta conseguir eliminar el agua no necesaria para la hidratación del cemento, pero sí que lo es para la manejabilidad del hormigón fresco durante su puesta en obra.

2.3.2.3 Propiedades del hormigón con árido reciclado

La idoneidad de los áridos reciclados de hormigón por su uso en distintas aplicaciones con un grado de requerimiento moderado como son los pavimentos, hormigones de limpieza o refuerzos, y recubrimientos, ha estado ampliamente examinado y demostrado por numerosos autores [49,50].

Se han establecido métodos de dosificación y porcentajes de sustitución de árido natural teniendo en cuenta las propiedades de los áridos reciclados de hormigón en la producción de hormigón por el que el hormigón reciclado convencional presente propiedades adecuadas en estado fresco y sea capaz de desarrollar propiedades mecánicas, una vez endurecidos, comparables a las del hormigón fabricado con áridos naturales. Algunos trabajadores de RCA sugieren que el uso de RCA grueso se podría extender a hormigones de altas prestaciones, ofreciendo así más valor añadido al material reciclado de hormigón para su futura venta [51,52].



En la aplicación de estos áridos para los hormigones de altas prestaciones, Miren Etxeberria y Andreu González [30] han estudiado su comportamiento. En ellos se ha concluido que los hormigones de altas prestaciones están diseñados para tener mejores propiedades mecánicas y una mayor facilidad de trabajo y resistencia a los productos químicos agresivos que el hormigón tradicional [53]. Algunos residuos se han utilizado con éxito en la fabricación de hormigón convencional e incluso en HPC [54,55]. Sin embargo, el uso de residuos cerámicos reciclados en la producción de HPC es casi inexistente debido a aspectos negativos asociados a su muy alta absorción [47]. Por otro lado, el uso de áridos reciclados cerámicos añade aspectos positivos como aglutinante adicional que podría ser útil en HPC. Si los minerales cerámicos se mezclan con hidróxido de calcio y agua, se crea una reacción puzolánica que pueden formar nuevos compuestos con una mejora de propiedades de resistencia y durabilidad del hormigón [45].

Propiedades del hormigón fresco

Como se ha comentado al apartado anterior, el diseño de la mezcla del hormigón reciclado es muy similar al procedimiento para el hormigón con áridos naturales pero son necesarias leves correcciones en el contenido de agua para obtener una trabajabilidad adecuada. Para obtener resistencias altas la relación agua/cemento será baja. Este hecho, sumado a la mayor absorción del árido reciclado hará que la trabajabilidad del hormigón sea, en general, seca o plástica [36].

Según Tu y Chen [3], las dosificaciones con áridos reciclados satisfacen los requisitos por el que se refiere a la consistencia y trabajabilidad en comparación con HPC, pero después de una hora, su trabajabilidad disminuye considerablemente respecto HPC a causa de la alta capacidad de absorción del árido reciclado. [52,56]

Propiedades del hormigón endurecido

A continuación se explican las propiedades físicas y mecánicas del hormigón reciclado. Como detallan los estudios mencionados a continuación la importancia de la zona de transición entre el mortero y el árido reciclado será un aspecto muy importante, ya que influirá a las propiedades mecánicas del hormigón reciclado.



Propiedades físicas

Densidad

Resultados experimentales [57] muestran una densidad media del hormigón reciclado de 2250Kg/m^3 , aproximadamente un 3.6% inferior a la densidad observada en el hormigón convencional de 2230Kg/m^3 .

Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión

Butler [58] estudia el fenómeno de rotura a compresión, estableciendo que el factor limitante de la resistencia del hormigón reciclado se encuentra en las zonas de transición intersticial existentes en el árido reciclado original o bien los de nueva creación (entre los morteros originales y nuevos) los planes de rotura que atraviesan los áridos reciclados indican en tal caso que la resistencia de los mismos es el factor limitante. Se concluye que la zona de transición existente en el árido reciclado, entre el árido natural y el mortero adherido, era el punto más débil.

Otras investigaciones [4] confirman, que la adquisición de la resistencia a la compresión en el hormigón reciclado se obtiene por la textura rugosa y la capacidad de absorción del mortero adherido original, que proporciona una mejor unión entre la pasta de cemento y los áridos reciclados, respecto de un hormigón convencional.

Liu [59] explica que, en aquel caso en que el hormigón original tiene una resistencia a compresión más baja que la del hormigón reciclado resultante, el mecanismo de rotura por compresión por la acción combinada de la superficie rugosa y la forma irregular de los áridos reciclados provoca la concentración de tensiones que a la vez induce a la fisuración a lo largo de la superficie de los áridos naturales originales.

Los últimos resultados de la investigación de Thomas [60] demuestran que, a edades tempranas, el comportamiento de los áridos tiene una mayor influencia en el comportamiento del hormigón fabricado con árido reciclado. Por lo tanto, los hormigones con una sustitución de áridos reciclados tienen pequeñas diferencias en su resistencia a la compresión para diferentes relaciones agua/cemento. A edades más avanzadas, el hormigón de árido reciclado con una



relación agua/cemento baja exhibe una mayor resistencia. Por lo tanto, la influencia de árido reciclado sobre las propiedades mecánicas del hormigón es mayor para las más bajas relaciones agua/cemento.

La adición de cenizas volantes a hormigones con áridos reciclados tiene una serie de efectos que deben ser considerados. Uno de ellos es la disminución de las resistencias a compresión a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo con áridos reciclados. Según estudios anteriores, a un 100% de reemplazo la resistencia de las probetas decrece alrededor de un 33% a 28 días [61].

Alta resistencia

Las resistencias a tracción de las mezclas con áridos naturales son siempre más altas, pero las diferencias no son superiores al 10% a los 28 días de edad. A su vez la influencia de los aditivos y las adiciones en la resistencia a tracción es mayor que la influencia en la resistencia a compresión cuando se introducen áridos reciclados [36].

El método de dosificación definido anteriormente y establecido por Limbachiya [35] demostró que se podían igualar o mejorar las resistencias a compresión del hormigón de altas prestaciones utilizando elevados porcentajes de sustitución de árido reciclado con la disminución de la relación agua/cemento efectiva [36]. Aún así, indicaba que hasta una sustitución del 30% de RCA grueso y sin modificar el agua no presentaba ningún efecto sobre la resistencia a compresión y, posteriormente, producía una reducción gradual proporcional al aumento del contenido de RCA. A los 28 días, la resistencia máxima obtenida por el hormigón con un 100% de RCA era inferior a 75 MPa mientras que para el hormigón que contenía hasta un 30% de RCA grueso obtuvo los 80MPa.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz [36] llegaron a la conclusión que los áridos reciclados obtenidos a partir de hormigón de resistencia moderada o de alta resistencia con áridos naturales de granito o basalto podían suponer un componente útil para el HPC. Añadiendo también que la sustitución de la fracción fina (0/2) por arena natural no era desaconsejable. Conseguir una resistencia a compresión característica de más del 80 MPa con áridos reciclados de hormigón original alrededor de 60MPa, utilizando un contenido razonable de aditivos y adiciones de humo de sílice, es factible y la diferencia con las resistencias del hormigón convencional son mínimas. Demostraron que el hormigón original puede contener una gran cantidad de pasta de cemento que, a la hora de triturarlo, se conserva adherida a los



áridos y que mantiene algunas propiedades cementantes cuando la zona carbonatada no es demasiado profunda. Esta actividad puede ser activada con mezclas de cenizas volantes o humo de sílice [62, 63] y colaborar con el ahorro de consumo de cemento, obteniendo un crecimiento en la resistencia a largo plazo.

Por otro lado, los autores Tsung-Yueh Tu, Yuen-Yuen Chen y Chao-Lung Hwang, afirman que observaron una reducción de entre el 20% y el 30% en la resistencia a compresión en comparación con el hormigón de altas prestaciones. Aún con la disminución, aseguran que si se llega a obtener propiedades adecuadas de durabilidad, el hormigón reciclado de altas prestaciones podría cumplir con solvencia su servicio en las aplicaciones prácticas.

Heidari y Tavakoli [46] estudiaron las propiedades mecánicas del hormigón en polvo cerámico y sus resultados mostraron que la adición en polvo de cerámica hasta el 20% como sustituto del cemento no tuvo un efecto negativo significativo en la resistencia a la compresión del hormigón.

El estudio de Acker [56] que valoraba la resistencia a compresión del hormigón de altas prestaciones con unos contenidos de RCA grueso de 5, 10 i 12,5% indicó que la resistencia con una determinada relación agua/cemento era similar a la de hormigones que contenían áridos naturales. Resultados similares fueron publicados por otros investigadores [51,52].

Resistencia a tracción

Etxeberria [4] constata en su experimentación que la resistencia a tracción indirecta del hormigón reciclado es más alto que en el hormigón de control por el efecto de la capacidad de absorción del mortero adherido original y la adecuada zona de transición que se produce en el hormigón.

Tabsh [64] hace un estudio en hormigones reciclados a partir de áridos de hormigones originales con diferentes resistencias características de diseño. En el hormigón reciclado obtenido a partir de áridos reciclados de un hormigón de 50MPa no se aprecian diferencias en la resistencia a tracción entre el hormigón reciclado y el de control. Sin embargo, cuando el origen de los áridos reciclados es un hormigón de 30Mpa y también si la fuente es desconocida se observan descensos en la capacidad resistente a la tracción entre un 10% y un 15% si el hormigón reciclado se produce para que tenga una resistencia a la compresión elevada de



50MPa, y entre un 25% y un 30% cuando el hormigón reciclado producido también se caracteriza a los 30MPa.

A partir de la experiencia de Rahal [57], la resistencia a tracción indirecta es de un 87.7% de media respecto a la del hormigón convencional, proporción parecida a la del análisis de la resistencia a compresión del hormigón reciclado. En el mismo ensayo de determinación de la resistencia a tracción efectuado a los 56 días se observan resultados de un 8% y un 5% más alto que en el ensayo a 28 días, respectivamente para el hormigón reciclado y el correspondiente hormigón de control.

Modulo elástico

Según Etxeberria [48], el modulo elástico del hormigón reciclado se ve reducido por incrementos en el tanto por ciento de sustitución con áridos reciclados, ya que los áridos reciclados son más propensos a la deformación que los áridos naturales. Asimismo, el módulo del hormigón depende significativamente del módulo elástico de los áridos y se puede esperar este comportamiento en el hormigón reciclado.

Gomes y de Brito [65] señalan que los resultados del ensayo del módulo de elasticidad más bajos para hormigones reciclados son debido a la presencia de mortero adherido en los áridos reciclados originales. Se observan pequeñas afectaciones alrededor del 10% en la pérdida de rigidez del hormigón reciclado para grados de sustitución de hasta el 50% mostrando que la afectación de la capacidad mecánica de este hormigón se encuentra limitado a un cierto nivel, contrariamente a aquello que ha afirmado en algunos casos.

Rahal [57] observa significativos aumentos del módulo elástico por incrementos de la resistencia a compresión en hormigones convencionales, observación menos obvia en el caso de hormigones reciclados ya que las dosificaciones de los elementos ensayados resultan en resistencias a la compresión entre 25 y 30MPa, rango por el cual la comparación entre ambas variables (el modulo y la resistencia) muestran una reducción de tan solo el 3% en el módulo elástico del hormigón reciclado respecto el correspondiente al de control.

Algunos autores [35] afirman que el módulo de elasticidad era similar para hormigones con RCA o con NA. Otros aseguran que el módulo elástico era ligeramente menor en el hormigón reciclado [36].



En la investigación de González, A. y Etxeberria, M. [30] concluyen que esta propiedad mecánica parecía ser más sensible a la sustitución del árido reciclado. Saben que el módulo de elasticidad del hormigón está influenciado por el módulo de elasticidad del árido grueso [66] y éste es proporcional al cuadrado de su densidad, de acuerdo con Lydon y Balendran [67].

Retracciones

En investigaciones de Suzuki [68], afirma que en las últimas décadas, el HPC con relaciones de agua/cemento mínimas ha sido muy utilizado en trabajos de investigación y se ha comprobado que han aumentado los hormigones en resistencia y rendimiento de la durabilidad y por lo que se podía utilizar para uso estructural bajo condiciones severas.

Por otro lado, ya se ha comentado que ha sido probado que el HPC es muy sensible a edades tempranas por agrietamiento y fisuras. Uno de los requisitos específicos es la práctica del curado [69]. Un curado adecuado es crucial para el desempeño del hormigón, y debe ser considerada como un factor clave para conseguir durabilidad en los HPC. Estos hormigones con baja relación agua/cemento tienen insuficiente cantidad de agua para mantener los poros capilares llenos de agua, necesitando de la hidratación del cemento y la reacción puzolánica. Esta reacción hace aumentar el riesgo de agrietamiento antes comentado a edades tempranas con contracción autógena, causado por el secado interno del hormigón.

Uno de los métodos investigado por los autores [68] para mitigar esta contracción autógena y la tensión interna, en términos de durabilidad del hormigón, se ha demostrado que es el curado interno de agua. Aïtcin, ha confirmado que el HPC debe ser curado durante 7 días para minimizar la retracción autógena y el riesgo de formación de grietas. Para ello lo mejor es el curado interno como ya se ha comentado en apartados anteriores [45] incorporando agua parcialmente saturada en los áridos, recuperando así de forma parcial el agua que se consume en la reacción de hidratación [70-77].

Algunos autores han encontrado que el árido fino resulta ser más efectivo en la distribución de la humedad que el árido grueso ligero [77, 78], mientras que otros autores [74] estiman que el tamaño del poro juega un papel más significativo en el proceso de curado interno que el tamaño del grano. La dosificación del árido ligero depende parcialmente de tener una cantidad suficiente de agua para el curado interno en la matriz de cemento. Se ha considerado que un contenido de árido ligero alrededor del 6% del peso del cemento podría eliminar totalmente la contracción autógena de HPC [74, 77, 79]. Por el contrario, Bentur [73]



ha estimado que el 25% del fino del árido ligero como sustitución de áridos naturales podría ser eficaz en la eliminación de toda la retracción autógena en HPC. Hoy en día, los estudios se centran en subproductos como aditivos minerales o con áridos reciclados normales. En el estudio de Suzuki [68] se utiliza árido reciclado cerámico en sustitución parcial de árido natural para mitigar la contracción autógena de HPC. Este se incorpora parcialmente saturado.

Los resultados demuestran que con una cantidad de 30-40% de sustitución de árido reciclado cerámico, se encuentra el nivel óptimo para el curado interno, mitigando eficazmente la retracción autógena tanto a edades tempranas como a los 28 días. El árido reciclado cerámico tiene un gran potencial para el curado interno y mitigar las retracciones autógenas. También se consigue una mejora de la reacción de hidratación del cemento lo que resulta un aumento significativo de la resistencia a la compresión, aproximadamente de un 10% a un 20%.

De esta manera, se concluye que puede resultar una alternativa atractiva y fiable en comparación con los áridos ligeros, tanto en el punto de vista económico como de ingeniería de materiales. Por lo que para los autores [68] se ha demostrado una alta eficiencia en mitigar la contracción autógena y las tensiones capilares internas.

Los investigadores Ali Heidari y Davoud Tavakoli [46] utiliza materiales porosos de residuos de cerámica para el curado interno de hormigón de alto rendimiento. En esta investigación se encontró una alta efectividad de las partículas cerámicas en la reducción e incluso eliminación completa de la retracción autógena. La incorporación del 40% de árido reciclado cerámico conduce a un HPC sin contracción que fue acompañado por un aumento significativo de la resistencia a compresión.

Durabilidad del hormigón de alta resistencia con árido reciclado

En la línea de las anteriores investigaciones, el artículo de Limbachiya [35] examinaba la influencia de los RCA gruesos en el hormigón de Altas Resistencias, de más de 50 MPa, el rendimiento del hormigón, a la vez que abordaba cuestiones prácticas y de durabilidad relacionadas con su uso, demostraban la idoneidad del uso de RCA para el uso de hormigones de altas resistencias. Los resultados mostraban que, hasta un 30% de RCA grueso, el hormigón podía ser utilizado en un abanico de aplicaciones de altas prestaciones en ingeniería y que las propiedades de durabilidad eran similares a las del hormigón convencional con árido natural.



En las últimas investigaciones Kou y Poon [80] dicen que debido a las reacciones puzolánicas entre cenizas volantes y CaOH_2 en los áridos reciclados, las propiedades mecánicas y la durabilidad a largo plazo mejoran significativamente.

González, A. y Etxeberria, M [30] concluyen que Los hormigones reciclados mostraron valores de capacidad de absorción muy similares a las del hormigón convencional cuando se utilizaron áridos finos de cerámica debido a la muy baja relación agua-cemento utilizado en mezclas de hormigón. Cuando se utilizaron áridos gruesos cerámicos la capacidad de absorción aumentó rápidamente en función de la tasa de reemplazo. En la serie de áridos gruesos reciclados, la capacidad de absorción fue muy influenciadora por las partículas gruesas de cerámica más porosas.

De acuerdo con la resistencia de la penetración de iones cloruro, el hormigón producido utilizando un máximo de 30 % de los áridos cerámicos finos obtenidos propiedades de durabilidad similares a las del hormigón convencional de alto rendimiento. El reemplazo del árido grueso cerámico produjo una reducción en las propiedades de durabilidad. El uso de adiciones a la mezcla de hormigón, como cenizas volantes, sería recomendable para reducir la capacidad de absorción y permeabilidad con el fin de mejorar las propiedades de durabilidad.



CAPÍTULO 3: FASE EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explica el procedimiento que se siguió a lo largo de toda la investigación para la obtención de los resultados. Se realizó una fase experimental muy exhaustiva para analizar la influencia de los áridos finos reciclados como el árido grueso reciclado en sustitución a los áridos naturales en porcentajes bajos en las propiedades de los hormigones de altas resistencias dando un énfasis especial al comportamiento de estos hormigones en las retracciones que pueden sufrir los hormigones.

La fase experimental comenzó realizando la caracterización de los materiales utilizados, a continuación se detallan las fabricaciones de los hormigones, así como las dosificaciones y las nomenclaturas de las probetas hechas en cada tipo hormigón.

Todos los hormigones se fabricaron con un cemento CEM I 52.5 R y con un 8.7% de cenizas volantes con respecto al cemento para poder conseguir más finura en la pasta. Para conseguir la trabajabilidad se utilizó un súper plastificante. El hormigón de control se fabricó utilizando arena y gravilla caliza. Para la fabricación de hormigones reciclados, se utilizaron dos tipos de arenas, una de ellas obtenida de la planta de reciclaje de Montoliu (arena mixta) y la otra fue una arena cerámica obtenida de la empresa Piera. Estas arenas fueron utilizadas en sustitución en 10%, 20% y 30% a la arena natural. Por otro lado se fabricaron dos hormigones con sustitución en 15% y 30% de la gravilla natural por gravilla reciclada (mixta) procedente de la planta de Montoliu.

En cada uno de los hormigones fabricados, se determinaron su densidad y consistencia en estado fresco, así como la retracción plástica. En estado endurecido se determinaron las propiedades físicas (densidad, absorción, porosidad), propiedades mecánicas (resistencia a compresión, a tracción indirecta y módulo de elasticidad), las propiedades de durabilidad como la succión capilar, la velocidad de los impulsos ultrasónicos o la resistividad eléctrica y por último las retracciones autógenas y por secado



3.2 MATERIALES UTILIZADOS

Antes de empezar explicando el proceso de fabricación, debemos caracterizar física y químicamente (en caso necesario) todos los materiales que se usaron en la fabricación. Hablamos tanto del cemento, como los áridos y en general todos los componentes del hormigón. A partir de sus propiedades se ha podido determinar las dosificaciones que se han usado para que se obtenga un hormigón con las características óptimas.

3.2.1 Cemento

Como ya se ha comentado en la introducción, en todo este proyecto se ha utilizado el mismo cemento. Es un tipo de cemento con alta resistencia inicial. Éste es un cemento Portland CEM tipo I 52.5 R, con resistencia a compresión de 52.5 MPa o superior a los 28 días.

Tabla 1. Composición química del cemento.

Composición	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	LOI
(%)	21.75	3.38	4.55	64.65	1.63	0.64	0.01	2.66	0.91

Tabla 2. Propiedades del cemento CEM I 52.5 R.

	Especificación	Valor medio
Clínker (%)	-	98
Componentes minoritarios (%)	-	2
Perdida al fuego (%)	< 5	0.9
Residuo insoluble (%)	< 5	0.5
Cloruros, Cl (%)	< 0.1	0.01
Sulfatos, SO ₃ (%)	< 4	2.67
Alcalinos (%)	-	0.5
Expansión (mm)	< 10	0.7

3.2.2 Cenizas Volantes

En todas las fabricaciones de hormigones se utilizó cenizas volantes como adición, las propiedades de los cuales se detallan en la tabla siguiente:



Tabla 3. Composición química de la ceniza volante.

Composición	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	LOI
(%)	55.45	26.93	5.86	5.7	1.5	1.5	0.61	0.05	1.41	0.8

3.2.3 Aditivo

Para la fabricación de todos los hormigones se utilizó el aditivo súper plastificante, Sika Viscorcrete 20HE para obtener la misma trabajabilidad deseada en todos los hormigones.

Este aditivo es adecuado para hormigones de altas prestaciones. Está formado por policarboxilatos modificado en base acuosa. Se presenta en forma de líquido poco viscoso y de color miel. Su densidad es de 1.085 g/cm³. Según las indicaciones del fabricante se recomienda una dosificación de entre 0.5% y el 1.5% del peso de cemento. En nuestro caso, este valor a oscilado entre el 0.55% y el 0.75% del peso del cemento, que se ha utilizado en las dosificaciones.

3.2.4 Agua

Se utilizó agua proveniente de la red de abastecimientos de agua potable.

3.2.5 Áridos

Recae un peso muy importante en este proyecto los áridos utilizados. Para la fabricación del hormigón de control se utilizaron arena y gravilla calizos. Se fabricaron hormigones reciclados con tres tipos de áridos reciclados. Dos arenas, una de ellas cerámica y la otra mixta y una gravilla reciclada de composición mixta.

A continuación se describirán las propiedades obtenidas en cada tipo de áridos. Todos los ensayos se realizaron de acuerdo a las especificaciones de la norma EN-UNE.

3.2.5.1 Ensayos realizados

Para obtener muestras representativas para determinar las propiedades, todos los áridos fueron cuarteados de acuerdo a la norma UNE-103 100 (UNE-95 B), introduciendo una



muestra de material, para ir fraccionándolo en repetidas ocasiones para obtener una muestra representativa lo más homogénea posible.

Composición

Se determinó la composición del árido reciclado mixto mediante la normativa UNE-EN 933-11:2010 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados”

Por otro lado se determinó la composición química del árido mixto y cerámico mediante la Fluorescencia de Rayos X.

Granulometría

La granulometría de todas las fracciones de áridos se determinó de acuerdo a la normativa UNE EN 933-1:1998, dónde se especifica que los tamaños nominales y la forma de las aperturas de los tamices son los siguientes:

8 – 5 - 4 – 2 - 1 - 0.5 - 0.25 - 0.125 - 0.063 mm



Figura 2. Tamices en la tamizadora.

Como se puede ver en la siguiente imagen, la tamizadora se configuró para que trabajase 2 minutos con intervalos de 10 segundos. Una vez se acabó este proceso se pesaron

las muestras retenidas en cada uno de los tamices y se construyó en un Excel la curva granulométrica con el % pasa en cada uno de los tamices.

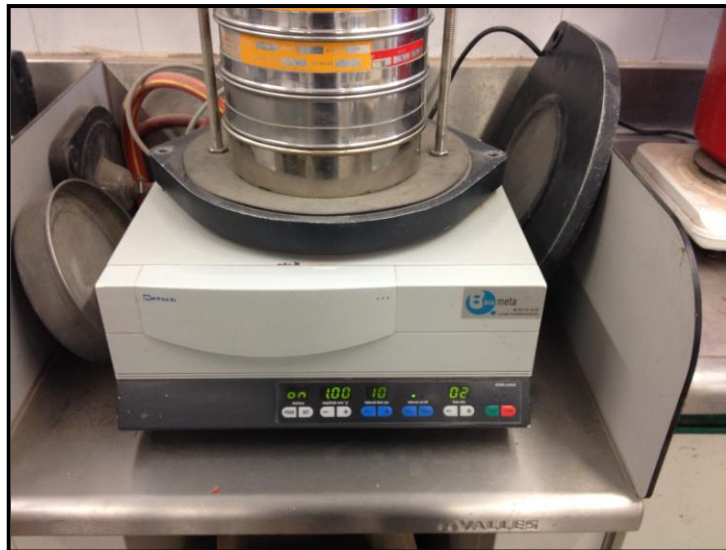


Figura 3. Configuración de la tamizadora.

Densidad y absorción

La densidad y absorción de los áridos se determinaron de acuerdo con la normativa UNE-EN 1097-6:2000 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua” Se obtuvieron la densidad de partículas aparente, la densidad tras secado en estufa y la densidad de partículas saturadas con superficie seca. Y la absorción se define como la relación entre el aumento de la masa de la muestra de áridos debida a una imbibición parcial de agua y la masa seca de la misma muestra.

3.2.5.2 Árido natural

El árido natural de origen calizo, tanto la arena natural (0/4) como la gravilla (5/10) fue suministrada por la empresa Promsa.

En la figura 4 se puede ver la granulometría de la arena y gravilla. Las dos granulometrías cumplen las características exigidas por la EHE.

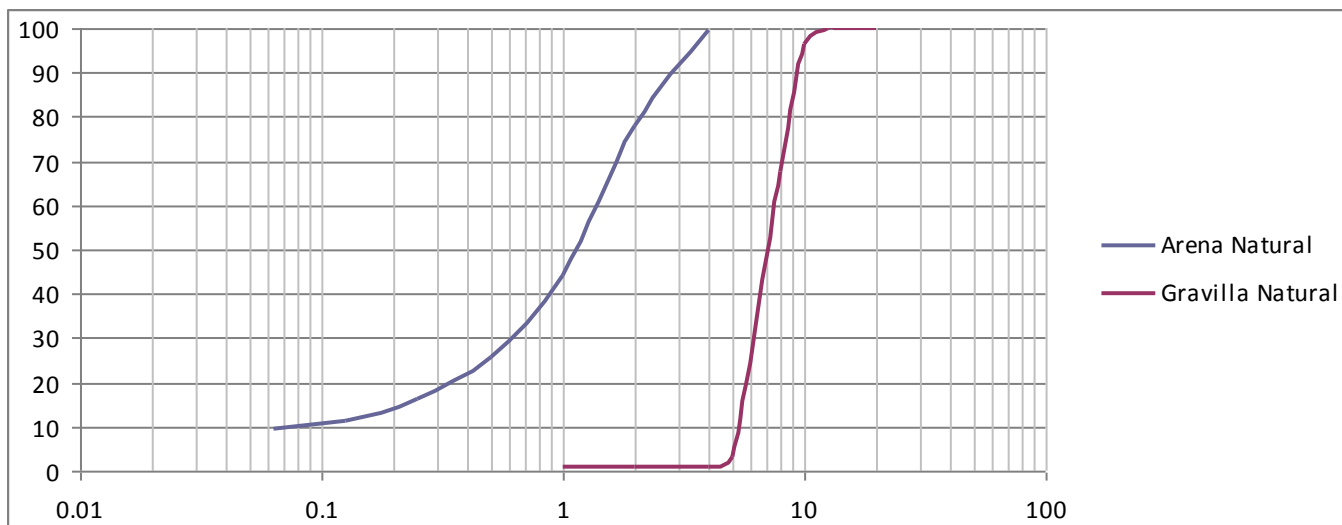


Figura 4. Curva granulométrica de la arena y la gravilla natural caliza (% pasa/tamices).

Nos guiamos por la norma UNE-EN 1097-6:2000 y se han determinado principalmente las densidades y la absorción de los áridos. También la curva granulométrica.

Tabla 4. Propiedades físicas del árido natural.

	Gravilla	Arena
Densidad SSS (Kg/dm3)	2.66	2.63
Densidad seca (Kg/dm3)	2.64	2.59
Densidad aparente (Kg/dm3)	2.7	2.7
Absorción (%)	0.87	1.7

3.2.5.3 Árido reciclado

Como ya se ha comentado en la introducción, los áridos reciclados mixtos proceden de Montoliu. El árido fino es la trituración del árido grueso y por lo tanto contienen los mismos componentes.

A continuación se muestran los componentes del árido reciclado:

Tabla 5. Composición del árido grueso reciclado de acuerdo a la norma UNE-EN 933-11:2009.

RA Composición (%)	Rc: Hormigón	Ru: Árido Natural	Rb: Cerámicos	Ra: Asfalto	Rg: Vidrio	Rx: Madera, plástico, yeso.
	22.2	9.8	67.3	0	0.1	0.7



Por otra parte, la tabla 6 describe la composición química de la arena reciclada mixta y cerámica.

Tabla 6. Composición química (%) de los áridos reciclados.

	Fe2O3	MnO	TiO2	CaO	K2O	P2O5	SiO2	Al2O3	MgO	Na2O
Árido Mixto	4,1	0,1	0,5	23,6	2,4	0,1	54,3	11,6	2,1	0,8
Árido cerámico	7,9	0,1	1,0	2,6	4,0	0,2	62,0	21,1	2,1	0,6

Granulometría

Previo a la caracterización, la arena cerámica se obtuvo de la trituración de material desechado en la fábrica de ladrillo, tal y como se puede ver en la figura 1. Parte de la trituración se realizó en el laboratorio de Materiales de Construcción del departamento de Ingeniería de la Construcción y se continuó la trituración (hasta convertir el diámetro nominal en 4 mm) en la Facultad de Geología.



Figura 4. Tres capazos, de derecha a izquierda, el ladrillo entero, ladrillo triturado a mano y ladrillo una vez pasado por la trituradora. La imagen de la derecha la trituradora.

El material superior a 4 mm fue rechazado, haciendo un tamizado a través del tamiz de 4 mm. En este caso, se utilizó para tamizadora más grande



Figura 5. Tamizadora grande y tamices.

Una vez triturada, se procedió a eliminar el exceso de filler, partículas inferiores a 0.063 mm, pasándolo por este mismo tamiz de forma manual.

En la siguiente figura se pueden ver la granulometría obtenida por cada una de las fracciones. En este caso también todas ellas cumplían la normativa EHE-08.

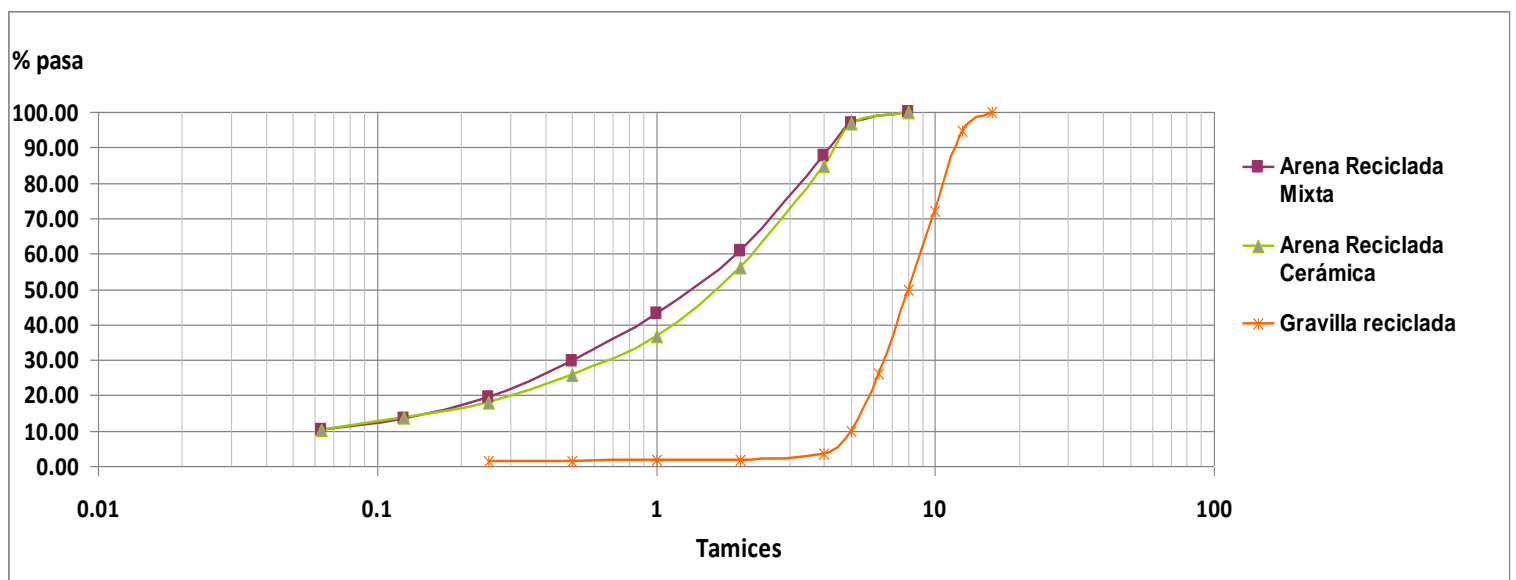


Figura 6. Granulometría de los áridos reciclados.

En la tabla 7 se describen la densidad y absorción obtenida por los áridos reciclados. Se puede apreciar que la densidad de los áridos reciclados fue menor que la de los áridos



naturales. Por el otro lado, la absorción fue mucho mayor en los áridos reciclados, propiedad importante para aspectos como el curado interior,

Tabla 7. Propiedades físicas de los áridos reciclados.

	<i>Arena cerámica</i>	<i>Arena reciclada mixta</i>	<i>Gravilla reciclada</i>
Densidad (g/dm³)	2.35	2.2	2.11
Densidad seca (g/dm³)	2.09	1.84	1.79
Densidad aparente (g/dm³)	2.83	2.88	2.63
Absorción (%)	12.55	16	17.82

En la tabla 8 se describen la capacidad de absorción de los áridos reciclados a 10 y 20 minutos. La absorción de 20 minutos fue la absorción efectiva considerada por los áridos a la hora de dosificar y determinar la relación agua-cemento efectiva.

Tabla 8. Absorciones a 10 y 20 minutos de los áridos reciclados.

	<i>Arena cerámica</i>	<i>Arena reciclada</i>	<i>Gravilla reciclada</i>
Porcentaje de saturación a 10 minutos	87%	100%	66%
Porcentaje de saturación a 20 minutos	100%	100%	70%

3.3 FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES

3.3.1 Nomenclatura de las probetas

Para una cuestión de orden y organización se han puesto nombre a todas las probetas fabricadas a partir de datos significativos que nos ayudaban a identificarlas. Estas se marcaban con un código que nos decían si tratábamos con probetas con hormigón convencional, si era de árido reciclado, de qué árido y en qué proporción.

En la siguiente tabla se pueden apreciar los hormigones con la nomenclatura de cada una de ellas:



Tabla 9. Nomenclatura de los hormigones.

HORMIGÓN	NOMENCLATURA
Hormigón convencional	HC
Hormigón con 10% de arena reciclada mixta	HR-10
Hormigón con 20% de arena reciclada mixta	HR-20
Hormigón con 30% de arena reciclada mixta	HR-30
Hormigón con 10% de arena reciclada cerámica	HRC-10
Hormigón con 20% de arena reciclada cerámica	HRC-20
Hormigón con 30% de arena reciclada cerámica	HRC-30
Hormigón con 15% de gravilla reciclada mixta	HRG-15
Hormigón con 30% de gravilla reciclada mixta	HRG-30

En los ensayos que se requería ensayar dos probetas, se numeraron alfabéticamente en A y B o numéricamente en 1 y 2, evitando de esta manera confusiones y cruce de datos entre ellas.

3.3.2 Dosificaciones

Las dosificaciones se realizaron mediante el modelo teórico de Fuller. Se utilizó la relación agua-cemento total de 0.35 en la fabricación del hormigón convencional. En este hormigón se determinó la relación agua cemento efectiva de 0.319 que fue mantenida constante en todos los hormigones fabricados. La relación agua cemento efectiva del hormigón convencional se determinó suponiendo la capacidad absorción de la arena y gravilla natural del 80% y 20%, respectivamente, respecto a su capacidad de absorción. Los hormigones fabricados con áridos reciclados, debido a su capacidad de absorción, se utilizaron húmedos, aproximadamente con una humedad del 90% de su capacidad de absorción. El objetivo fue disminuir su capacidad de absorción a la hora de fabricar para conseguir un control en la trabajabilidad, y en la relación agua-cemento efectiva, y aprovechar este agua como agua de curado.

La capacidad de absorción de los áridos reciclados en 20 minutos era del 100% en las arenas reciclados y del 70% en los áridos gruesos. Por lo que a la hora de la fabricación del hormigón se añadió el agua que sería absorbida de acuerdo a su capacidad de absorción y debido a la humedad existente y la capacidad de absorción de los áridos, los hormigones



fabricados con áridos reciclados obtuvieron una relación agua-cemento total mayor al obtenido por el hormigón convencional.

En la siguiente tabla se especifican las proporciones en los distintos hormigones fabricados. El árido reciclado y el agua dependían de la humedad de la fabricación. Esta solía estar en el 90% de su absorción. Pesos en Kg.

Tabla 10. Proporciones en las distintas fabricaciones (resultados en Kg).

HORMIGÓN	CEMENTO	CENIZAS VOLANTES	AGUA TOTAL	ARENA	GRAVILLA	ÁRIDO REICLADO	a/c EFECTIVA
HC	420	40	161	912	929.68	0	0.319
HR-10	420	40	173	820	929.68	64.87	0.319
HR-20	420	40	183	729.6	929.68	129.74	0.319
HR-30	420	40	193	638.4	929.68	194.6	0.319
HRC-10	420	40	170	820.8	929.68	73.76	0.319
HRC-20	420	40	179	729.6	929.67	147.52	0.319
HRC-30	420	40	188	638.4	929.68	221.28	0.319
HRG-15	420	40	179	912	790.23	94.93	0.319
HRG-30	420	40	197	912	650.77	189.87	0.319

Primero se añadieron en la amasadora los áridos más gruesos, en nuestro caso, la gravilla, seguido por el árido más fino, la arena. Seguidamente se introdujeron el cemento y la cantidad de cenizas pertinente. Una vez realizados el período de 2 minutos del primer ciclo, se vertió el agua de manera constante. Una vez acabado la amasada de todos los materiales, se añadió el aditivo súper plastificante de forma continua.



Figura 7. De izquierda a derecha, arena natural caliza, cemento y gravilla natural caliza. En la figura de la derecha, la amasadora

Una vez todo amasado, se cogió una muestra de la amasadora y se hizo la prueba de la consistencia con el cono de Abraham según marca la normativa UNE 83-313-90. No fue necesario realizar la prueba de consistencia con el cono de Abraham en todas las fabricaciones ya que se decidió trabajar con consistencias fluidas. Una vez amasado el hormigón, se hizo una inspección visual, para comprobar que no hayan segregado los materiales y que tuviera la consistencia adecuada.



Figura 8. Cono de Abraham para saber la consistencia del hormigón

En cualquier caso, se debe saber que para medir la consistencia del hormigón, se clasifica mediante la diferencia del asiento del hormigón que había en el molde respecto a la altura de este. En función de este descenso, se puede definir la consistencia del hormigón según los valores de la tabla siguiente:

Tabla 11. Consistencia del hormigón a partir del ensayo del cono de Abraham

CONSISTENCIA	ASIENTO (CM)
Seca	0 - 2
Plástica	3 - 5
Blanda	6 - 9
Fluida	10 - 15
Líquida	>16



En la siguiente tabla se muestran las cantidades de aditivo utilizadas en cada hormigón para cada una de las fabricaciones. Tal y como podemos ver se ha utilizado entre el 0.56% y un 0.95%

Tabla 12. Proporción en % (sobre el peso de cemento) utilizado en todos los ensayos.

Homrígó n	Propiedades físicas y mecánicas	Retracción plástica	Retracción autógena y por secado
HC	0.56	0.56	0.56
HR-10	0.56	0.56	0.56
HR-20	0.56	0.56	0.56
HR-30	0.56	0.56	0.56
HRC-10	0.56	0.56	0.95
HRC-20	0.56	0.56	0.95
HRC-30	0.56	0.56	0.95
HRG-15	0.56	0.56	0.68
HRG-30	0.56	0.56	0.68

3.3.3 Llenado de probetas, compactación y conservación

Para efectuar esta parte de la fase experimental se siguió en todo momento la norma UNE-EN 12390-2:2001 Ensayos de hormigón endurecido. Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.

Una vez se había amasado el hormigón y se había conseguido la consistencia óptima, el siguiente paso fue el llenado de las probetas. Éstas previamente estaban impregnadas de aceite, para facilitar el desmoldado. El llenado se hacía con el hormigón fresco y se dejaban que fraguaran 24 horas. Se hacía en las condiciones óptimas, colocando un paño humedecido encima y un plástico para que el fraguado sea en condiciones de temperatura y humedad adecuadas, evitando así la pérdida de agua por evaporación en temperatura ambiente. Se realizó esto en todos los hormigones excepto en los hormigones que se estudio la retracción.

Los moldes se llenaron de hormigón en 2 o 3 capas dependiendo del ensayo que se realizaba y más concretamente del tamaño de la probeta. Se compactaba en una mesa vibratoria durante 30 segundos con la suficiente atención para que el hormigón pudiera sacar el máximo de aire posible y a la vez, tener el cuidado suficiente para que el hormigón no segregara. Además se ha golpeado con una maza los moldes para expulsar el aire que pudiera quedar ocluido en el hormigón. Una vez compactado el hormigón sólo quedaba enrasar bien el



hormigón en el molde. De esta manera evitaremos al máximo los problemas relativos a superficies irregulares, etc. Esto influye a la hora de ensayar la probeta.



Figura 9. Antes de amasar. Material y moldes preparados para la fabricación.

Se utilizaron distintas probetas y en diferente número, a partir del ensayo que se ha procedido a hacer. Este ha sido el balance en cada uno de los ensayos y en cada una de las fabricaciones de cada hormigón:

-Ensayo de retracción plástica:

- **2 moldes prismáticos de 600 x 150 x 150 cm.**

-Ensayos de propiedades mecánicas; resistencia a tracción, resistencia a compresión y de módulo elástico:

- **11 moldes cilíndricos 10 x 20 cm.**

-Ensayos de propiedades físicas y de durabilidad:

- **4 moldes cúbicos de 10 x 10 x 10 cm.**

-Ensayo de retracción autógena:

- **2 moldes cilíndricos de 300 x 150 cm.**

-Ensayo de retracción por secado:

- **2 moldes prismáticos de 75 x 75 x 255 cm.**
- **2 moldes cilíndricos de 300 x 150 cm.**
- **1 molde cúbico de 15 x 30 cm.**



Pasadas las 24 horas de la fabricación y llenado de las probetas, se extraían las probetas de los moldes y se marcaban con la nomenclatura adecuada y previamente acordada.

Después se introducían en la cámara húmeda, para que así el hormigón no perdiera la hidratación y se efectuara un buen curado. En esta cámara las probetas permanecían entre 7 y 28 días, que es cuando se empiezan a efectuar los primeros ensayos. Las condiciones térmicas de la cámara húmeda han sido de unos 21°C de temperatura y casi un 95 % de humedad. Se llevó a cabo este procedimiento en todos los hormigones excepto en los que se estudió la retracción.



Figura 10. Cámara húmeda donde se conservan las probetas.

3.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

En los posteriores apartados se detallan todos los ensayos llevados a cabo para la caracterización de los hormigones tanto en estado fresco (densidad y retracción plástica) como en endurecido (propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad), los procedimientos seguidos para cada uno de ellos y los resultados que se han obtenido en cada caso.

Como trabajo de investigación que es este proyecto, se puede remarcar la importancia de los ensayos como fuente principal para la obtención de resultados y posteriores análisis.



3.4.1 Propiedades del hormigón fresco

En todos los hormigones fabricados se determinaron la densidad del hormigón fresco, de acuerdo a la norma UNE 83317 y la retracción del hormigón fresco.

La retracción plástica se determinó midiendo el cambio de longitud que sufría cada una de las probetas en las primeras 24 horas después de su fabricación.

3.4.4.1 Retracción plástica

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, este ensayo se hacía con el hormigón fresco, por lo que se iban grabando datos ininterrumpidamente durante las primeras 24 horas después de la fabricación del hormigón [30].

Una vez fabricado el hormigón, se llenaban 2 moldes de 600 x 150 x 150. Estos moldes consistían en tres piezas metálicas, forradas con una capa de teflón que ayudaba a que no hubiera ningún tipo de adherencia con el molde y permitir los pequeños movimientos del hormigón sin ningún tipo de impedimento. Estas tres piezas iban enganchadas mediante unas roscas. Al final, tal y como muestra la siguiente fotografía, se ponía una pieza de silicona. En los laterales se pusieron placas metálicas, una de ellas con 4 tornillos donde quedaba enganchado al hormigón y la otra con un agujero donde iba colocado el LVDT. Entre la silicona y el molde se ponían unos tacos de madera para que cuando se hormigonera el molde, este estuviera bien colocado.

Una vez hormigonado se colocaba dentro de la cámara tal y como muestran las fotografías posteriores.



Figura 11. Moldes montados antes de ser utilizados.

Los moldes se han hormigonado en una mesa vibratoria. Una vez acabado este proceso, los moldes fueron trasladados a una cámara climática en condiciones de unos $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y con una humedad del $50\% \pm 5\%$.

En la cámara y previo numerado de las probetas, se colocaban los LVDT's. Éstos estaban conectados a un sistema de adquisición de datos y a una fuente de alimentación, que a su vez éste estaba conectado en el ordenador dónde podíamos ir viendo las expansiones y retracciones. Una vez colocado y a partir del momento válido de la primera toma de datos le sacábamos las maderas que se pueden ver en la siguiente fotografía para evitar frenar la expansión del hormigón.

Se calcula que más o menos pasaban entre 20 y 30 minutos des de la fabricación del hormigón hasta la colocación precisa del LVDT. Es un tiempo que se estimaba necesario para todo el proceso de moldeado y colocación hasta la primera toma de datos.



Figura 12. Probeta una vez efectuado el llenado.



Figura 13. Condiciones en la cámara donde se dejaban las probetas 24 horas.

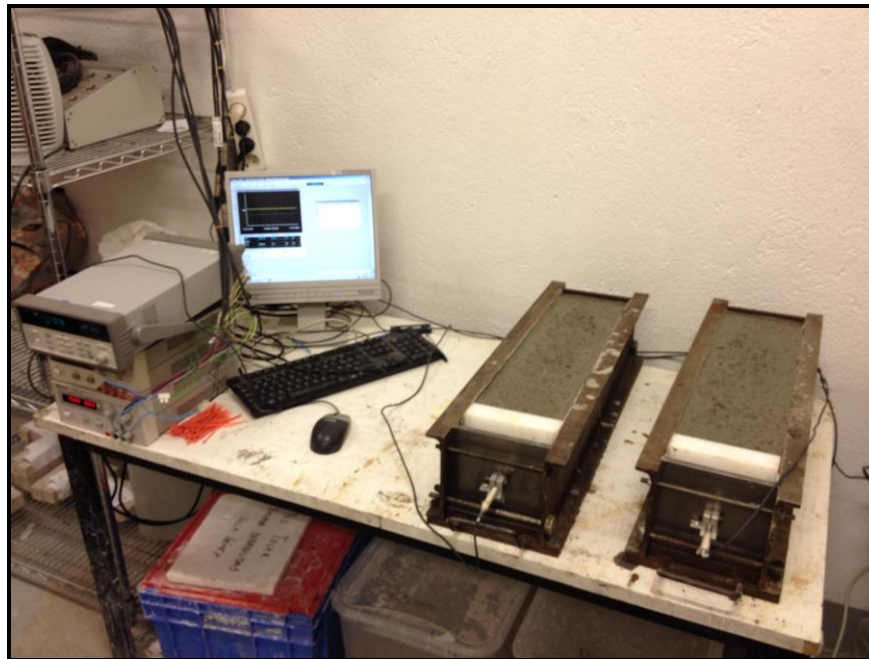


Figura 14. Colocación de los VLDT's y conexión al sistema de adquisición de datos y la fuente de alimentación a 15 V.

3.4.2 Propiedades del hormigón endurecido

Se realizaron los ensayos de propiedades físicas (la densidad, la absorción y el volumen de poros). Siguiendo con los ensayos de propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo elástico). Después se exponen los ensayos de durabilidad efectuados (succión capilar, resistividad eléctrica y velocidad de impulsos ultrasónicos). Por último se han efectuado ensayos de retracción por secado y autógena, donde se han estudiado las retracciones con el hormigón endurecido.

3.4.2.1 Determinación de propiedades físicas

Estos ensayos permiten determinar las características físicas de los hormigones. Estos son concretamente los de densidad, absorción y volumen de poros.

Para la realización de este ensayo se siguieron las especificaciones según las normas une 83-312-90 Y ASTM C642-97. Se utilizaron las probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm y para obtener resultados significativos se han realizado en 2 probetas de cada tipo de hormigón. Se determinaron las propiedades físicas del hormigón a 7 y 28 días.



A continuación se muestran las fórmulas marcadas por las normativas UNE 83-312-90 y ASTM C642-97 que permitieron calcular todos los parámetros para conocer la densidad, absorción y volumen de poros accesibles.

-Absorción después de inmersión (%)= $(A/(B-A)) \cdot 100$

-Absorción después de ebullición (%)= $(A/(B-A)) \cdot 100$

-Densidad seca (G1)= $(A/(C-D)) \cdot \rho_w$

-Densidad después de inmersión= $(B/(C-D)) \cdot \rho_w$

-Densidad después de ebullición= $(C/(C-D)) \cdot \rho_w$

-Densidad aparente (G2)= $(A/(A-D)) \cdot \rho_w$

-Volumen de poros = $((G2-G1) / Gg2) \cdot 100$

En cada una de las fórmulas aparecen los parámetros **A, B, C y D**. Todos ellos fueron los pesos de las probetas obtenidos en diferentes estados.

En el primer caso, el peso A, es el peso seco de la probeta que lo determinamos después de que hubiese pasado 48 horas en una estufa a 100°C, perdiendo así toda el agua que tenía en su interior.

Para la determinación del peso B, se dejó sumergidas las 2 probetas durante 72 horas, después de haberlas sacado de la estufa y haberlas dejado que se enfríen un poco. Se quiso saturar la probeta completamente de agua. Una vez pasado este tiempo se sacaron del agua, se secaron las partes superficiales de la probeta y se pesaron, obteniendo el segundo peso.

Para la obtención del peso C, hervimos durante 6 horas las probetas que han estado previamente 72 horas sumergidas en agua. De esta manera conseguimos saturar definitivamente las probetas. Al final este proceso podíamos obtener el tercer peso.

Por último, y para obtener el peso D, completando el ensayo, se calculó el peso hidrostático de las probetas que previamente habían hervido durante 6 horas.

3.4.2.2 Determinación de propiedades mecánicas

Para caracterizar el hormigón fue fundamental conocer sus propiedades mecánicas. Para ello se sometieron dos probetas cilíndricas de 10 x 20 cm a un ensayo destructivo en la prensa “Toni Technik” modelo 2031 con una capacidad de carga de 3000 KN.



En los siguientes apartados se detallan y se describen todos los ensayos realizados para la determinación de las propiedades mecánicas; resistencia a compresión, a tracción y el módulo elástico.

Resistencia a compresión

Se ensayaron dos probetas cilíndricas de 10 x 20 cm a los 7 y 28 días de acuerdo a la norma UNE 83-304-84.

El procedimiento a seguir fue aplicar la carga sobre la probeta de forma continua a una velocidad de unos 0.5MPa/s. En el momento en el que la probeta se deformase de manera muy rápida antes de romper, fue el valor de carga de rotura máxima a la que el hormigón ha llegado.

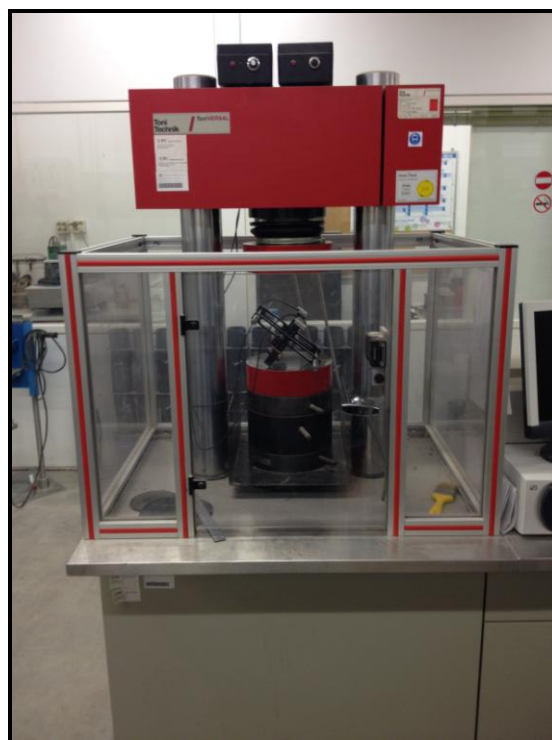


Figura 15. Prensa utilizada en el ensayo a compresión,

Resistencia a tracción

Para obtener la resistencia a tracción de los distintos hormigones, se evaluó a tracción indirecta a los 28 días de edad mediante el ensayo brasileño. Al igual que en el ensayo a



compresión, las probetas utilizadas en este ensayo fueron las cilíndricas de 10 x 20 cm, e igual que con el ensayo a compresión, se ensayaron dos probetas para cada uno de los tipos de hormigón. En el ensayo de resistencia a tracción se siguió el ensayo según la norma UNE 83-306-85.

Al contrario que en el ensayo a compresión, la probeta no se coloca de manera vertical, sino que se coloca de manera horizontal. Simulando de esta manera que la carga de los platos se aplique sobre una generatriz del cilindro provocando el efecto de la tensión a tracción. Se aplica la carga de forma continua y progresiva, pero en este caso el valor de la velocidad a la que se debe aplicar la carga es algo menor que en el caso del ensayo a compresión, 0.03 MPa/s.

Módulo de elasticidad

Este ensayo se realizó a los 28 días de edad con probetas cilíndricas de 10 x 20 cm, siguiendo el procedimiento descrito en la normativa UNE-EN 13412.

En este ensayo se evaluó la deformación del hormigón, cuando este está sometido a una fuerza de compresión. Para poder llevar a cabo este ensayo fue necesario saber la resistencia máxima a compresión del hormigón, ya que para la realización de este ensayo se hicieron ciclos de carga y descarga, siendo la carga máxima para el ensayo un 33% de su carga máxima, determinada en el ensayo de resistencia a compresión.

3.4.2.3 Determinación de propiedades de durabilidad

Resulta fundamental un estudio detallado de la durabilidad de los hormigones fabricados, ya que junto con la capacidad de resistencia y el comportamiento a largo plazo del hormigón, se podría predecir la vida útil de los hormigones a ciertos tipos de exposiciones, como en el caso de humedades altas o temperaturas altas. A continuación se explican los ensayos de durabilidad realizados.

Succión capilar

El procedimiento que describe el ensayo de absorción capilar lo describe la norma de ensayo Swiss Standard- SIA 162/1- Succión capilar.

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del coeficiente de succión capilar (S) a partir de una probeta de hormigón endurecido, por lo que se realizó una vez alcanzada la edad de 28 días. Este coeficiente nos da una idea acerca de la porosidad de dicho hormigón.

Se ha efectuado este ensayo con probetas cúbicas de hormigón de dimensiones 10 x 10 x 10 cm.

Una vez que las probetas cumplieron los 28 días de edad en la cámara húmeda, se dejaron en la estufa a 70°C durante 4 días, tiempo necesario para que la probeta alcanzase una masa constante, lo que quiere decir que nuestra muestra está completamente seca. Previamente a esto, se habían impermeabilizado los dos primeros centímetros de la franja lateral por encima de una de las bases mediante pintura de poliuretano.

Una vez secas, y después de haberlas pesado, la cara impermeabilidad en sus laterales fue sumergida en 5mm de agua. Se procedió a determinar la absorción mediante la variación de peso en el tiempo para cada una de las muestras ensayadas. Las mediciones se realizaron a los 5, 10, 15, 20, 30, 45 minutos y luego 1, 2, 4, 6, 24, 48 y 72 horas.

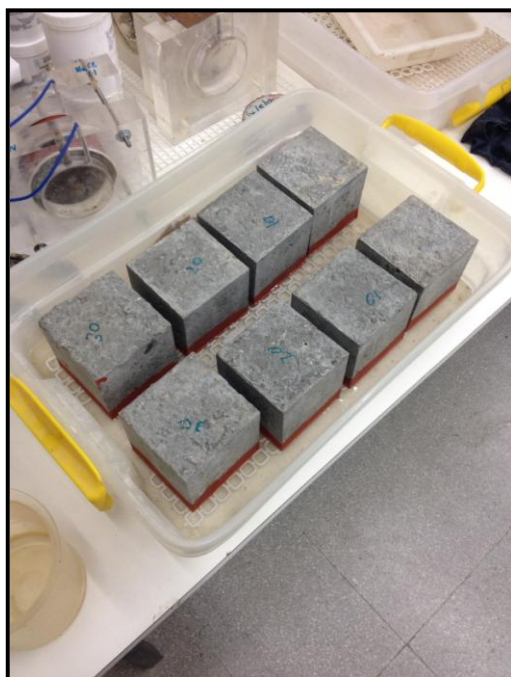


Figura 16. Probetas con 5 mm de agua para el ensayo de succión capilar.



Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos (UPV- Ultrasonic Pulse Velocity)

El otro ensayo de durabilidad que se llevó a cabo fue el de velocidad de propagación de impulsos electromagnéticos. Este ensayo se efectuó a los 28 días de edad del hormigón y se hizo en probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm. Se rige según la norma UNE 83308:1993. Es un ensayo rápido y no es destructiva, ya que la probeta no se rompe ni se le efectúa ninguna carga que pueda fatigar la muestra.

Este ensayo se hizo con un generador de impulsos eléctricos que se utiliza para realizar las mediciones, un par de palpadores (emisor y receptor), un amplificador y un temporizador electrónico para la medida de intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador- transmisor y el comienzo de la onda a su llegada al palpador-receptor. El procedimiento resulta muy sencillo. Se untan cada una de las caras de la probeta con vaselina para así facilitar el acoplamiento acústico entre el hormigón y la cara de cada palpador. Se tomaron tres lecturas, y se anotaron el tiempo de propagación de la onda en el hormigón y la distancia entre los transductores. Previo a tomar las medidas, es importante asegurarse que el aparato esté calibrado. En caso negativo se deberá hacer tal y como lo indican las instrucciones de uso.

Una vez se tuvieron los tiempos de propagación de la onda en el hormigón y la distancia entre los transductores, los valores obtenidos son divididos por las distancias (en mm) y entre el tiempo (en μs).

Las propiedades que influyen en la velocidad del impulso son el módulo elástico, la densidad y el volumen de los poros. En el hormigón estas propiedades dependen del tipo de árido, su dosificación, la relación agua/cemento y la madurez del hormigón. Por lo tanto, se asegurar que la velocidad del impulso depende de la mezcla específica del hormigón.

En la siguiente tabla se puede observar el rango de calidad del hormigón según sea el valor de la velocidad obtenida en el ensayo. A mayor velocidad, mejor calidad, ya que implica una menor porosidad y un hormigón más compacto. Los hormigones de alta resistencia, como los fabricados en este trabajo, esta propiedad tiene una relevancia especial. No interesa que se obtenga valores de calidad altos.

Tabla 13. Rango de calidad según la velocidad de los impulsos ultrasónicos según la normativa UNE 83308:1993

CALIDAD	VELOCIDAD DE LOS IMPULSOS ULTRASÓNICOS [m/s]
Excelente	4500
Buena	4500-3000
Dudosa	3500-3000
Pobre	3000-2000

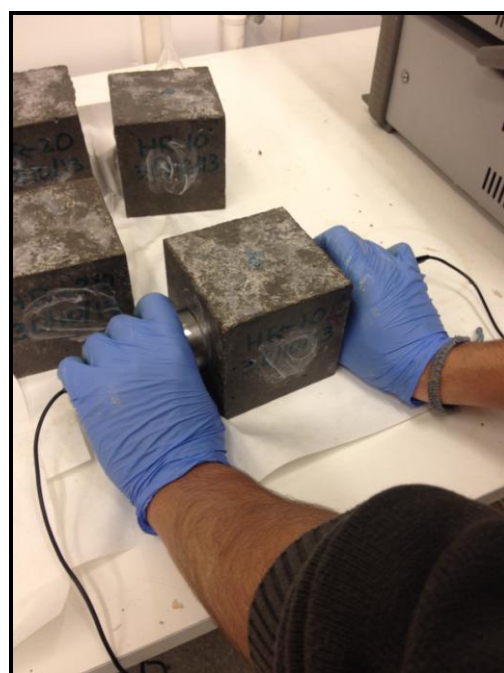


Figura 17. De izda a dcha, aparato para medir los impulsos ultrasónicos. Realización del ensayo UPV.

Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica (expresada en $\Omega \cdot m$) se determinó a partir de la medida volumétrica de la resistencia eléctrica (Ω). A través de la ley de Ohm se puede obtener la corriente directa que circula a través de un metal conductor sabiendo que es directamente proporcional al potencial aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del conductor [92, 93].

$$I = V/R$$

Donde,

- I es la corriente medida en Amperios [A]
- V es el potencial eléctrico en Voltios [V]
- R es la resistencia eléctrica [Ohm]

Este ensayo se realizó a los 28 días edad de cada uno de los hormigones fabricados. Este ensayo también se realizó con probetas cúbicas de 10 x 10 x 10 cm. Se utilizó un gel conductor depositado en cada una de las caras donde se ponía el transductor. De esta manera favorecíamos el contacto. Se conectaba a una fuente de alimentación de 20 V de corriente.

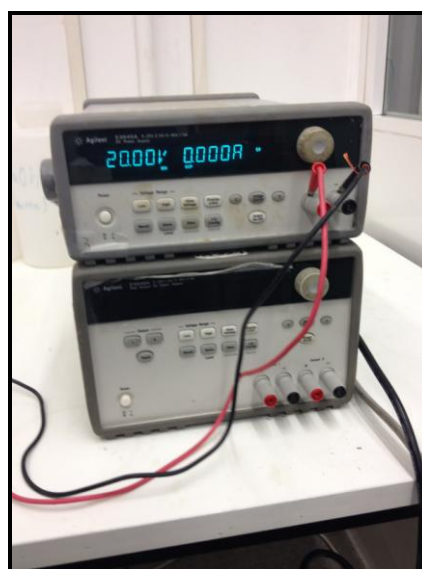
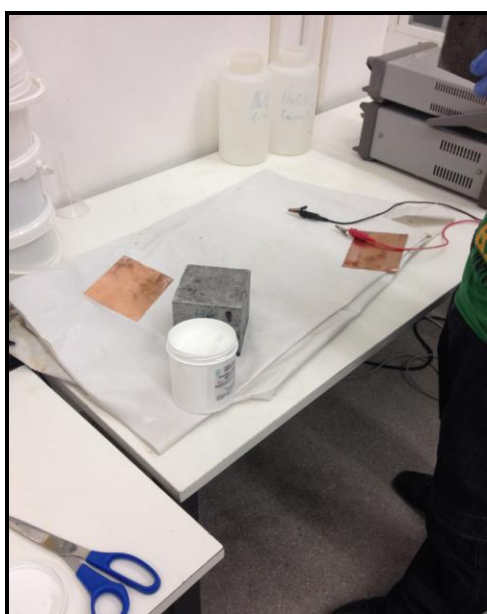


Figura 18. Probeta, transductor, gel conductor y fuente de alimentación de 20V

En la siguiente tabla se puede observar el grado de corrosión según el valor de resistividad resultante del ensayo:

Tabla 14. Tipo de corrosión según la resistividad eléctrica.

CORROSIÓN	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA [Ohm.cm]
Muy alta	< 5,000
Alta	5,000-10,000
Moderada	10,000-20,000
Baja	>20,000

3.5.4.4 Retracciones

En cada uno de los hormigones fabricados se determinó la retracción autógena y la retracción por secado. En los hormigones que estuvieron expuestos a la determinación de la retracción de secado también se determinó la pérdida de peso.

Este ensayo es doble, ya que bajo las mismas condiciones de conservación de las probetas se realizan ambos ensayos; el de retracción autógena y la de retracción por secado. En una cámara climática con unos $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y con una humedad del $50\% \pm 5\%$.

Previo a la realización del ensayo se requirió preparar los moldes con el material necesario para que el ensayo se haga con éxito como por ejemplo el sistema de adquisición de datos, de igual forma que se utilizó en el ensayo de retracción plástica. Esta vez, las galgas extensiométricas que fueron embebidas en el hormigón, se conectaron al sistema de adquisición de datos, junto a la una fuente de alimentación que a su vez esta conectado al programa del ordenador, median la deformación de secado como autógena de los hormigones expuestos a ambiente seco Como de las probetas que estaban selladas mediante cinta de aluminio. Todas las probetas estuvieron en la cámara climática a unos $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y con una humedad del $50\% \pm 5\%$.



Figura 19. Instalación de las probetas en la cámara climática. Probetas conectadas al sistema de adquisición de datos, a la fuente de alimentación, a los canales y al ordenador.

Retracción autógena

En el caso del ensayo de retracción autógena, se realizaron de acuerdo a lo descrito en el artículo de los investigadores Suzuki [47] se utilizaron probetas cilíndricas de 300 x 150 cm. En cada una de las probetas se colocó una galga embebida con un hilo de nailon resistente en el centro del molde (ver figura 21). Era importante que la instalación de la misma fuese precisa y cuidadosa, ya que la galga es delicada y no podía recibir ni golpes ni movimientos bruscos, ya que desvirtuaría los resultados.

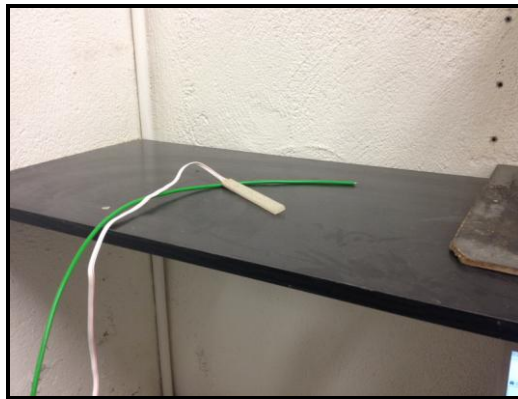


Figura 20. Galga y medidor exterior de temperatura dentro de la cámara climática donde se conservan las probetas.



Figura 21. Probetas del ensayo de retracción autógena y la colocación de las galgas.

En cada hormigonada, se llenaban 2 probetas cilíndricas del tamaño especificado para realizar el ensayo de retracción autógena, cubriéndolas con una capa de cinta para evitar el contacto con el exterior y en consecuencia, pérdida de agua. Una vez cubiertas se conectaban al sistema de adquisición de datos durante 24 horas



Figura 22. Probetas con y sin cinta una vez moldeadas en el ensayo de retracción autógena.

Al día siguiente de la fabricación, se desmoldan las probetas y una vez selladas habiéndolas envuelto con cinta de aluminio y se volvieron a conectar a la adquisición de datos que estaba ubicada en la cámara climática durante 27 días más.

En la cámara, las probetas fueron colocadas en la estantería tal y como se ilustra en una imagen anterior. La adquisición de datos se programó para medir cada 1 minuto y los datos se transmiten al ordenador. Aproximadamente cada 24 horas se hicieron copias de los datos obtenidos, revisando que los ensayos iban bien.



Figura 23. Probeta después de ser desmoldada, cubierta con la cinta y preparada para la instalación en la cámara climática.

Retracción por secado

En el caso del ensayo de la retracción por secado, el procedimiento llevado a cabo fue parecido en cuanto a condiciones de conservación pero un poco distinto en cuanto al procedimiento de actuación. Para este ensayo se fabricaron 2 probetas cilíndricas de 300 x 150 cm y dos probetas prismáticas de 75 x 75 x 255 cm para cada tipo de hormigón. Estas últimas se ensayaron de acuerdo a la norma ASTM C596.

Las probetas cilíndricas llevaban una galga extensiométrica embebidas de la misma manera que las probetas ensayadas a la retracción autógena.

Una vez moldeadas, se dejaron 24 horas, para que endureciera. Una vez pasadas estas 24 horas se llevaban a una cámara húmeda y se introducían en agua durante 48 horas, tal y como dice la norma. Pasadas las 48 horas se llevaron a la misma cámara climática (20°C-50% humedad) y las probetas cilíndricas se conectaban a la adquisición de datos hasta los 50 días de edad. Las probetas prismáticas, en las que se habían colocada dos pivotes en los extremos (tal y como se describe la norma ASTM C596) la medición se realizaba manualmente con un medidor de longitud. Se determinó el peso de cada una de las probetas desde el inicio hasta los 28 días de edad. La normativa marca que los días de medición es a los 4, 7, 14 y 28 días y luego si es preciso, 8, 16 y 32 semanas. En nuestro caso se ha llegado a 52 días como mucho.



Figura 24. Midiendo las probetas prismáticas con el comparador para evaluar la retracción por secado manualmente.



CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados, en este capítulo se van a discutir los resultados y se van a estudiar detalladamente con el fin de poder extraer las mayores conclusiones posibles.

Los resultados se presentan separando el estado del hormigón en que se hicieron los ensayos. Por este motivo primero se analizan los ensayos de densidad fresca y retracción plástica que se hicieron en el hormigón en estado fresco. Después se analizan los resultados del hormigón en estado endurecido con ensayos de propiedades físicas, propiedades mecánicas, propiedades de durabilidad y retracciones autógenas y por secado.

4.2 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

Tal y como se menciona anteriormente, en estado fresco del hormigón se determinaron la densidad y la retracción plástica.

4.2.1 Densidad fresca

Durante la fabricación, antes del llenado de las probetas, se obtuvieron para cada uno de los hormigones el valor de la densidad fresca de acuerdo a la norma UNE 83.317 e ISO 6276. En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores de las densidades frescas de cada hormigón.



Tabla 15. Densidades en $[g/dm^3]$ en estado fresco de los hormigones en todos los ensayos.

Homrigo n	Teórica a	Propiedades físicas y mecánicas	Retracción plástica	Retracción autógena y por secado
HC	2.39	2.37	2.40	2.40
HR-10	2.39	2.40	2.41	2.39
HR-20	2.37	2.39	2.39	2.38
HR-30	2.36	2.37	2.37	2.36
HRC-10	2.39	2.42	2.39	2.39
HRC-20	2.39	2.41	2.38	2.38
HRC-30	2.38	2.40	2.38	2.38
HRG-15	2.38	2.37	2.39	2.38
HRG-30	2.35	2.35	2.38	2.36

Es interesante observar como a medida que se aumentó el porcentaje de árido reciclado en el hormigón, la densidad teórica de éste disminuyó. Esta variación de la densidad según la cantidad de árido reciclado utilizado, fue debida a la ligereza del árido reciclado respecto del árido natural. Tal y como se puede ver las densidades de todos los hormigones son muy similares, por lo que se puede decir que hasta los 30% de sustitución tanto de la arena como de la gravilla, no hubo apenas diferencia

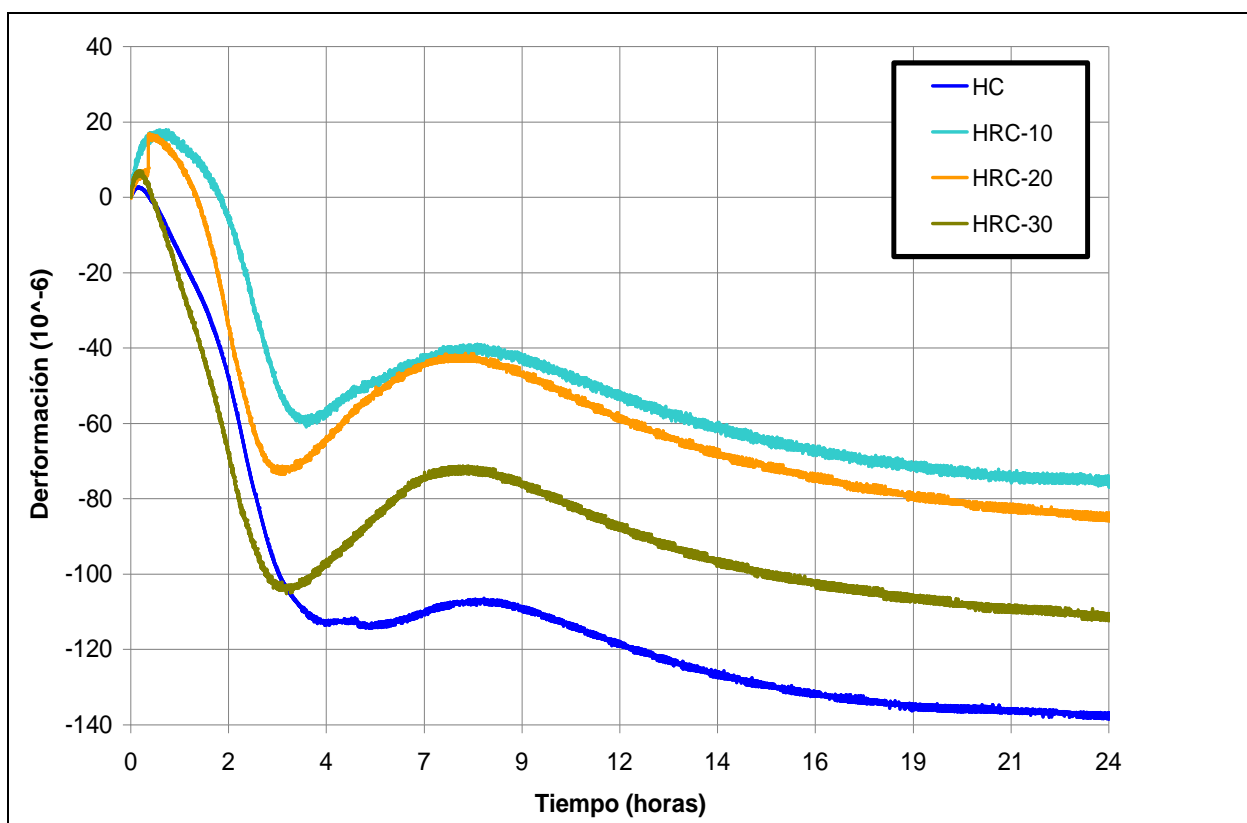
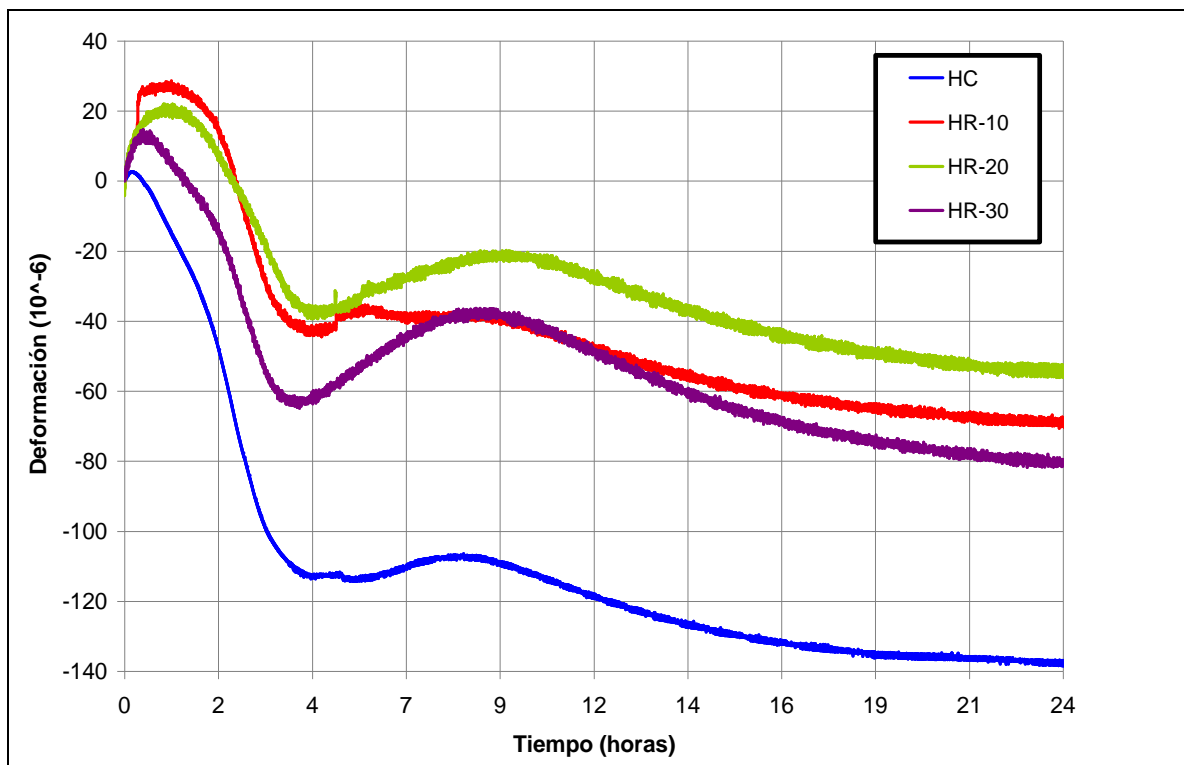
4.2.2 Retracción plástica

A continuación se muestra los resultados del ensayo de retracción en forma de gráfico comparativo entre todos los hormigones. Como ya se ha comentado, los resultados se obtuvieron a las primeras 24 horas después de su fabricación.

Primero se presenta un gráfico con las 24 horas y posteriormente se hace un gráfico con una ampliación de las 7 primeras horas para poder estudiar mejor los comportamientos iniciales.

Para que sea un poco más ordenado y se puedan diferenciar mejor los hormigones de forma visual, se presentan en 3 gráficos diferentes, comparando la arena reciclada mixta, la arena reciclada cerámica y el árido grueso reciclado con el hormigón convencional

Los resultados se dan en microdeformaciones.



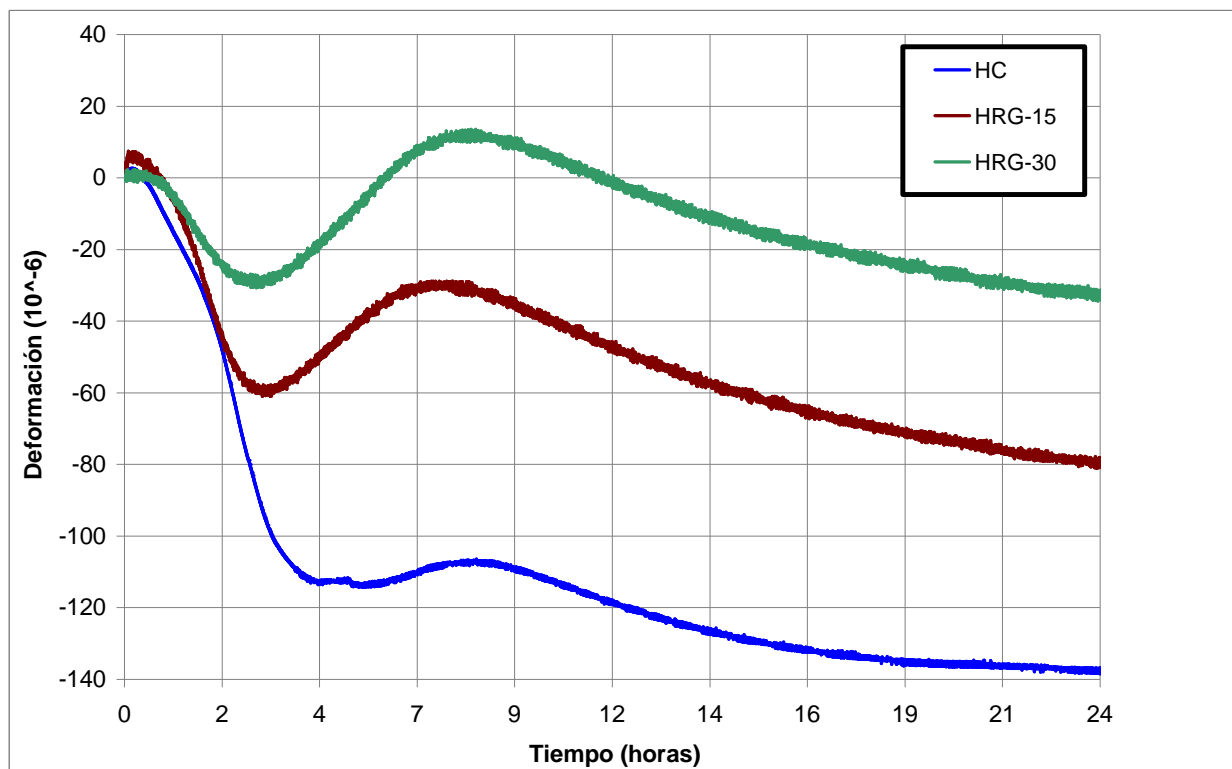


Figura 25. Gráfico comparativo de la retracción plástica de todos los hormigones en sus 24 primeras horas

Se puede observar que la mayor deformación se produjo entre las primeras 4 horas desde la fabricación de los hormigones. Y sobretodo fue entre la hora 1 y la 4 el momento que más peligro tiene, ya que es cuando acabó la exudación y empezó la retracción [66, 82]

De forma general, se puede observar que el HC y luego el HRC-30 fueron los que más retracción tenían en todos los hormigones fabricados. Se puede observar una ligera expansión en los primeros minutos después de la fabricación, luego hasta la hora 4, la retracción fue pronunciada, a partir de aquí la misma se recuperó y se expandió hasta la hora 8 y después volvió a retraerse de una manera más o menos constante hasta las 24 horas.

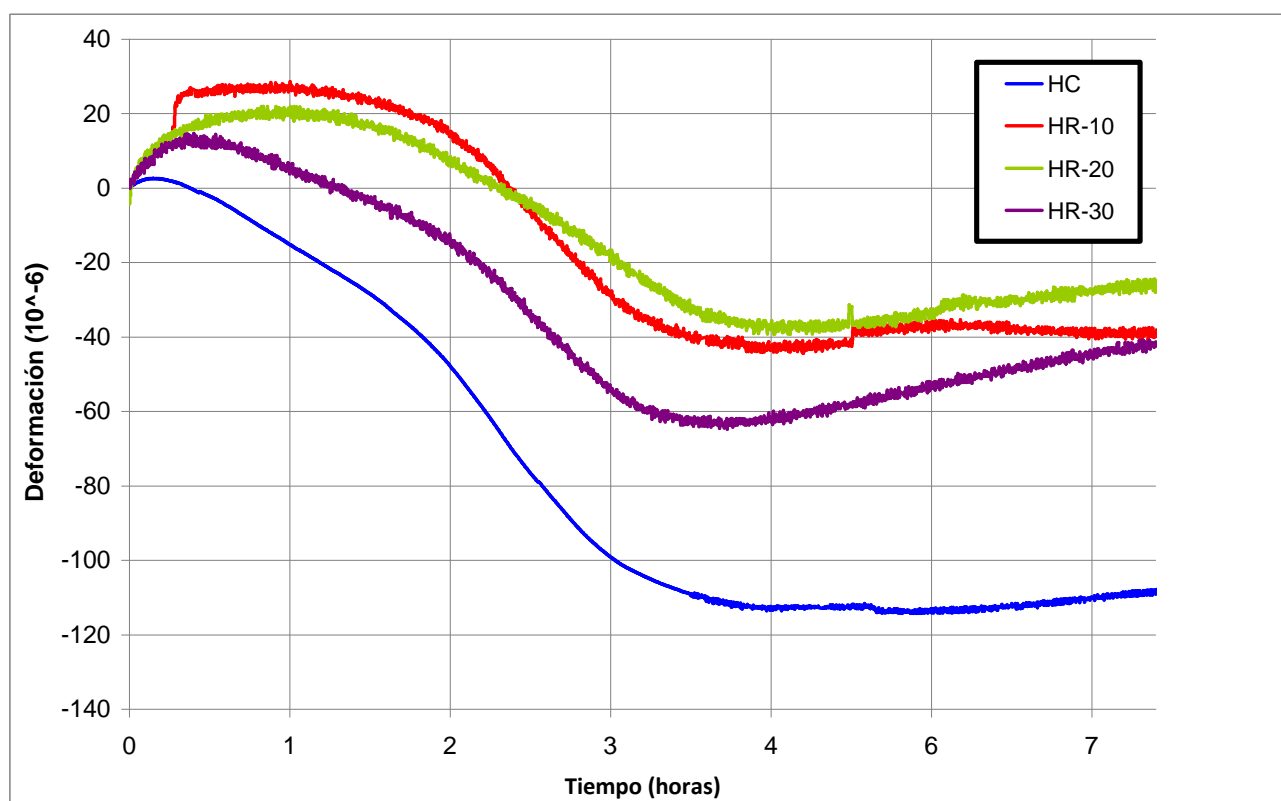
El HRG-30, en contra, fue el que menos retracción tuvo. Eso puede ser por la relación a/c total elevada, siendo la a/c efectiva igual en todos los hormigones y por lo tanto el agua libre era el mismo en todos los hormigones. Al tener más agua dentro de los áridos, el hormigón no se secó de forma prematura y permitió un fraguado óptimo, evitando la generación de fisuras. Además este hormigón fue el que menos deformación tiene de forma general.



Por lo general se comportaron mejor los hormigones con arena reciclada mixta, ya que se producen menos deformaciones en todos sus porcentajes de sustitución de árido reciclado.

A partir de las 8 horas, la retracción de todos los hormigones avanzó de una forma paralela y siguen una trayectoria muy parecida.

A continuación los gráficos de la retracción plástica con un aumento en las 7 primeras horas:



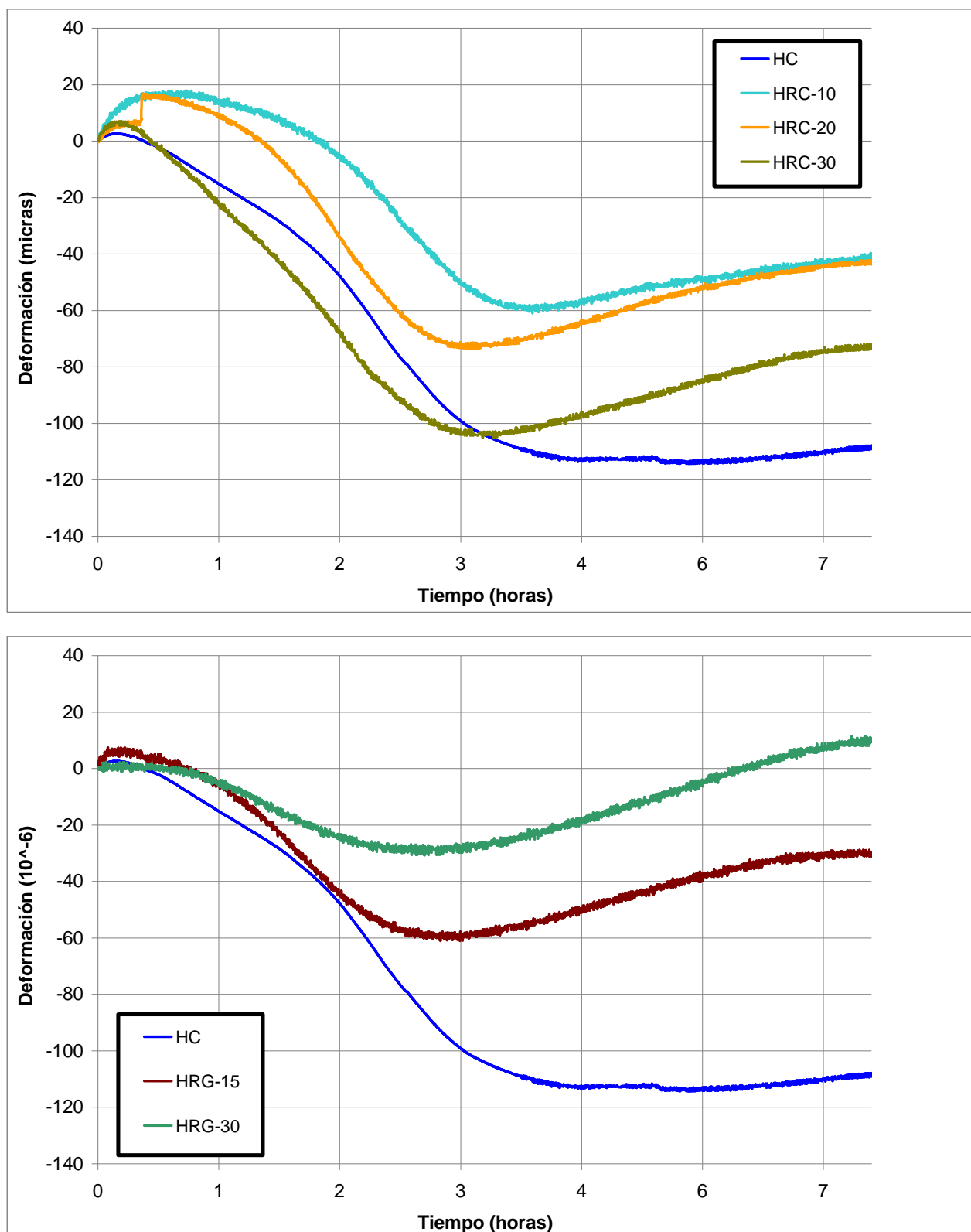


Figura 26. Gráfico comparativo de la retracción plástica de todos los hormigones en sus 7 primeras horas



Como se puede observar en estos gráficos más detallados entre las 0 y 7 horas de fabricación, hubo un fenómeno conjunto en todos los hormigones. Entre las primeras 0-1 hora hubo una expansión del hormigón que fue más pronunciada en los hormigones con arena reciclada. Esta podría ser por la reacción de los aluminatos del árido reciclado. Sin embargo, se ha de recalcar que la expansión fue mínima.

Luego hubo una retracción importante entre la media hora y la hora desde la fabricación. A partir de la tercera-cuarta hora, el hormigón tuvo otra reacción de hidratación donde actúan los silicatos y se produjo una expansión del hormigón de nuevo. Esta es más importante en los hormigones con áridos reciclados, ya que en HC casi no se produce. Esto es debido al agua que tienen los áridos. El curado interno, gracias al agua de los áridos, puede evitar, en gran parte, una retracción mayor y por lo tanto la creación de fisuras.

Todos los hormigones fabricados con áridos reciclados obtuvieron una retracción inferior al hormigón convencional, debido a la aportación del agua existente en los áridos reciclados favorecen la aportación a la pasta de cemento reduciendo su retracción plástica.

Los hormigones fabricados con áridos reciclado grueso obtuvieron la menor retracción plástica, probablemente siendo más fácil la salida del agua de estos áridos.

Los hormigones fabricados con árido fino mixto sufrieron menores retracciones que los hormigones fabricados con árido fino cerámico, probablemente debido a que tienen mayor facilidad de movimiento del agua.

En las primeras horas, debido a la hidratación del cemento (producción de etringita) se produjo expansiones en los hormigones siendo mayores en hormigones fabricados con áridos finos reciclados donde pudo existir aportación de aluminatos. Sin embargo, se ha de decir que las expansiones que sufrieron los hormigones fueron mínimas.



4.3 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

4.3.1 Propiedades físicas

A continuación se incorpora una tabla con las principales propiedades físicas ensayadas a 28 días.

Tabla 16. Resultados de las propiedades físicas A 28 días

	HC	HR-10	HR-20	HR-30	HRC-10	HRC-20	HRC-30	HRG-15	HRG-30
Absorción [%]	2.62	2.47	2.72	3.03	2.37	2.44	2.54	2.54	3.20
Densidad seca [g/cm³]	2.39	2.38	2.37	2.33	2.38	2.36	2.35	2.39	2.33
Volumen de poros [%]	6.25	5.88	6.45	7.07	5.62	5.77	5.97	6.05	7.48

La absorción de los áridos reciclados mixtos fue mayor que los áridos reciclados cerámicos y, por eso, no es de extrañar entonces que la absorción fuese mayor en los hormigones que contenían estos áridos. El HR-20 y HR-30 tienen mayor absorción que el HC, igual que el HRG-30. En el caso del árido grueso es por el alto porcentaje de árido reciclado y por tener el volumen de poros más alto.

Por otro lado, y debido al mortero adherido en los áridos reciclados, se puede observar como la densidad seca disminuye al aumentar el porcentaje de sustitución de los áridos reciclados.

En el siguiente gráfico podemos observar la comparativa entre el volumen de poros de los hormigones con árido reciclado y el hormigón convencional.

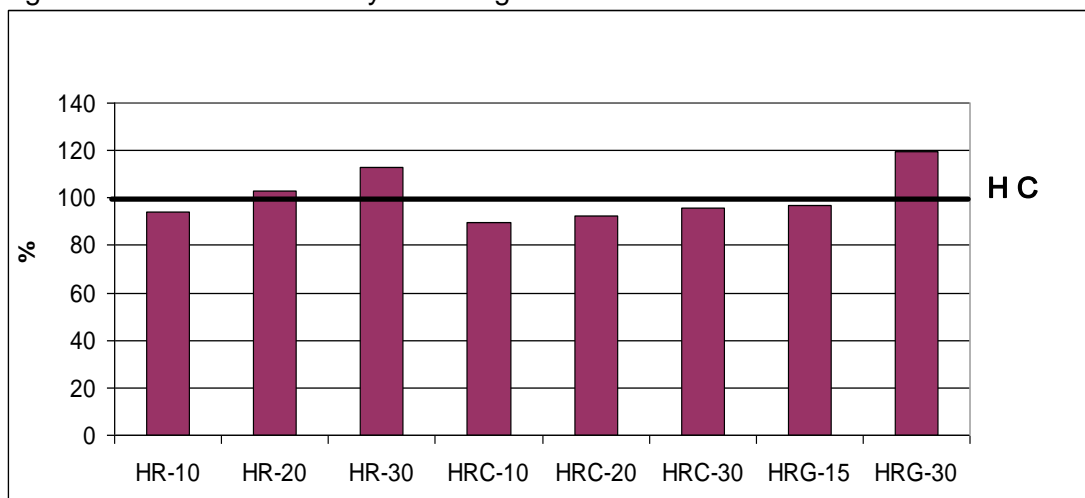


Figura 27. Comparación entre el volumen de poros de los hormigones con árido reciclado y el hormigón convencional (en %)



En este gráfico se puede observar, como se ha dicho antes, que el volumen de poros era mayor, en cuanto mayor era el porcentaje de sustitución del árido reciclado. De esta manera se tiene que el HR-30 obtuvo un mayor volumen de poros que el HR-20 y a su vez el HR-20 tuvo mayor volumen de poros que el HR-10. De igual manera pasa con los hormigones con árido cerámico.

En el caso de la arena reciclada mixta, el porcentaje de volumen de poros fue mayor en todas las proporciones de sustitución en comparación con la arena reciclada cerámica, que incluye menos huecos en la estructura del hormigón. Al querer hormigones de altas resistencias, nos interesaba que el volumen de huecos de poros fuera lo menor posible.

Al tener mayor finura los áridos cerámicos y mayor cantidad de filler que los reciclados mixtos, la compactación del hormigón mejoró y por eso tenía menor cantidad de poros. Por otro lado, también puede ser la causa su posible reactividad puzolánica.

Se puede observar que en el caso del hormigón con sustitución del 15% de gravilla reciclada el volumen de poros fue menor que en el caso del HC. En contra, se puede observar que no fue así en el caso de la sustitución del 30% de la gravilla reciclada. Aumentando el volumen de poros en el cuerpo del hormigón.

Destacar que, tal y como podemos ver en la tabla 15, las densidades secas de los hormigones con áridos reciclados tendían a ser inferiores al hormigón convencional. Además también era menor a medida que el porcentaje de árido reciclado fue mayor.

A continuación se muestra el gráfico comparativo de las absorciones entre hormigones de árido reciclado y el hormigón convencional:



Figura 28. Comparación entre la absorción de los hormigones con árido reciclado y el hormigón convencional (en %)

Se puede observar que los hormigones fabricados con arena cerámica tenían menor absorción que el hormigón convencional. También el HR-10. Sin embargo, los hormigones fabricados con áridos reciclados mixtos, a mayor porcentaje de árido reciclado, mayor es su absorción, sobrepasando en el HR-20 y el HR-30 el hormigón convencional.

Respecto los hormigones fabricados con árido reciclado grueso a medida que aumentamos el porcentaje de árido grueso, aumenta su absorción. En el caso del HRG-30 sobrepasamos el valor de la absorción de HC, pero en el caso del HRG-15 no.

Se puede observar que los hormigones con mayor porcentaje de árido reciclado tenían un porcentaje mayor de absorción, cuestión lógica ya que usamos áridos de alta capacidad de absorción para poder estudiar efectos de curado interno en los hormigones.

En el caso de la arena reciclada mixta la diferencia fue mayor entre porcentajes que en el caso de la arena reciclada cerámica. Esto puede ser porque la arena reciclada mixta contenía un mayor volumen de poros, donde se almacena más agua, teniendo mayor capacidad de absorción que la cerámica.

En general, esta muy relacionado la absorción con el volumen de poros del hormigón, y comparando los gráficos de las propiedades vemos que son muy parecidas.



4.3.2 Propiedades mecánicas

En la siguiente tabla se resumen los resultados a 7 y 28 días de las propiedades mecánicas de todos los hormigones ensayados. A 7 días se tienen los resultados a compresión y a 28 días los resultados a compresión, a tracción y de módulo de elasticidad

Tabla 17. Resistencia a compresión a 7 y 28 días de todos los hormigones

	7 días Compresión (MPa)	Compresión (MPa)	28 días Tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
HC	78.15	82.63 (+5.43%)*	3.95	42432.00
HR-10	75.84	89.20 (+14.98)	4.00	43260.50
HR-20	77.37	83.84 (+7.73%)	3.87	38938.00
HR-30	77.00	89.12 (+13.59%)	4.08	37802.50
HRC-10	76.27	86.52 (+11.84%)	5.57	41619.50
HRC-20	84.04	88.52 (+6.60%)	4.17	41208.00
HRC-30	82.90	93.84 (+11.66%)	3.76	41436.50
HRG-15	75.22	79.32 (+5.17%)	4.48	41227.00
HRG-30	72.97	80.76 (+9.65%)	2.57	40362.00

* Incrementos de la resistencia a compresión de 7 a 28 días (%)

Se puede observar que a 7 días, el HC casi era el hormigón con más resistencia a compresión, Sólo por debajo de los HRC-20 y HRC-30. A 28 días fue al revés, sólo el HRG-15 tenía una resistencia menor a 28 días. Además el incremento del crecimiento, junto con el mismo HRG-15, también fue el menor. Eso nos indica que las resistencias han aumentado por la fabricación de hormigones con árido reciclado.

4.3.2.1 Resistencia a compresión

A continuación se muestra la gráfica comparativa entre todos los hormigones fabricados con árido reciclado y el hormigón convencional. Primero el gráfico de los valores de la resistencia a compresión a 7 días y después a 28 días.

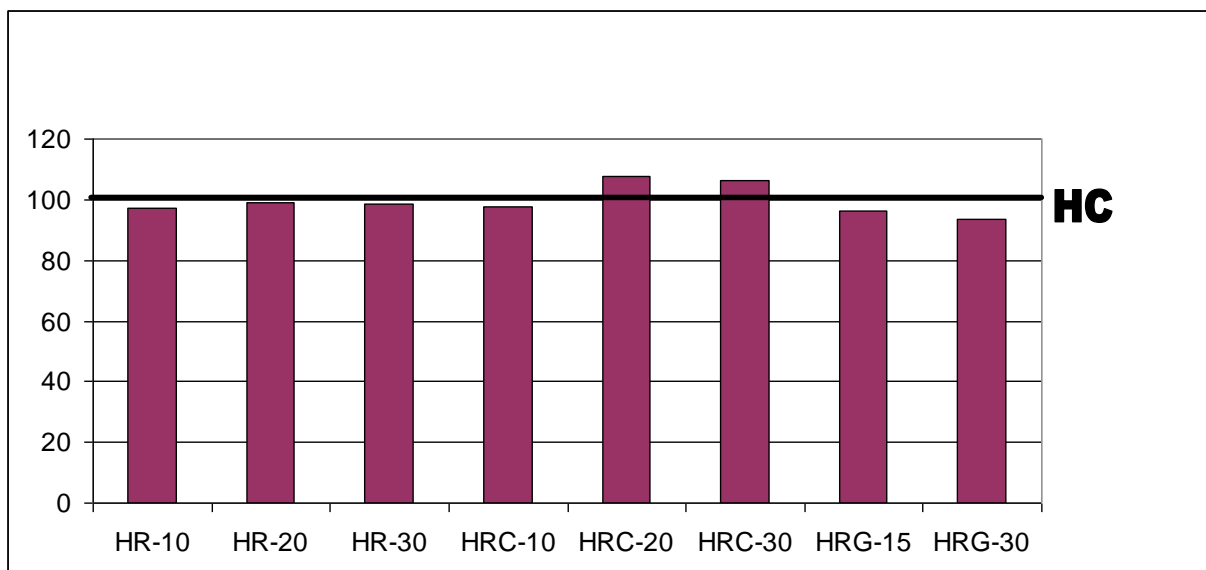


Figura 29. Gráfico comparativo a 7 días de todos los hormigones fabricados con árido reciclado y el hormigón convencional (en %)

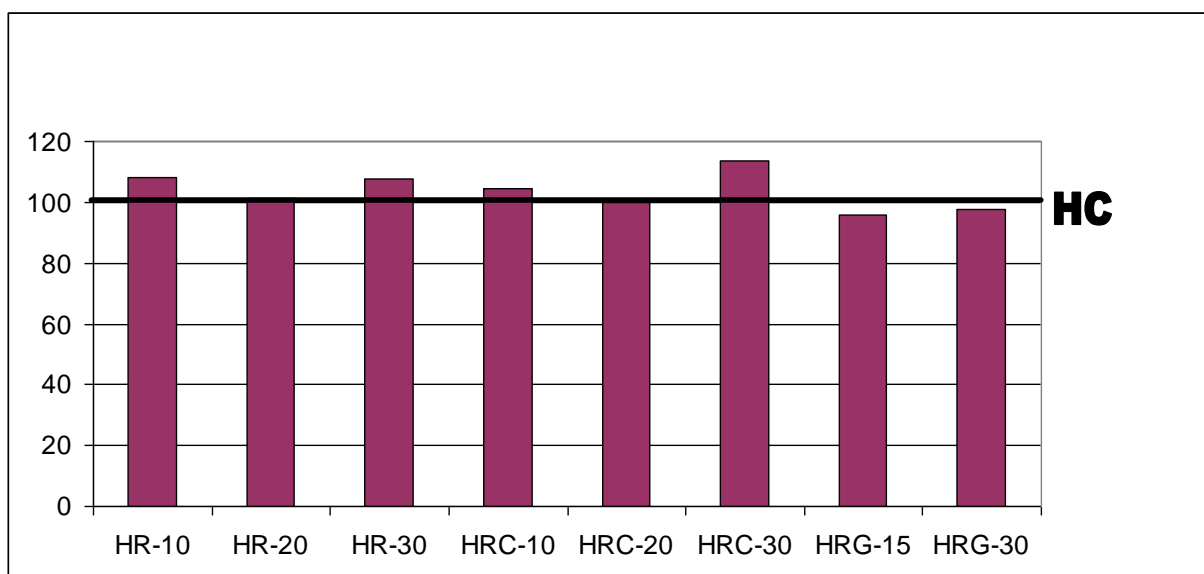


Figura 30. Gráfico comparativo a 28 días de todos los hormigones fabricados con árido reciclado y el hormigón convencional (en %)

Se puede ver que la resistencia a compresión a 7 días era mayor el HC que el resto de hormigones fabricados con arena reciclada excepto el HRC-20 y HRC-30. Aunque se debe comentar que en el caso de las arenas recicladas todos los valores se asemejan mucho.

Una vez pasados los 28 días se observa que las resistencias aumentaban, siendo el HC el que menor resistencia a compresión tenía comparado con los hormigones fabricados con arena reciclada. No ocurre lo mismo con los hormigones fabricados con árido grueso reciclado.



En este caso los hormigones fabricados con áridos reciclados gruesos tenían menores resistencias a 28 días que el HC.

Se puede concluir que la resistencia a compresión a 28 días de los hormigones con arenas recicladas podría ser favorable en cuanto al curado interior de los mismos en las condiciones ambientales óptimas.

4.3.2.2 Resistencia a tracción

En el siguiente gráfico se muestra de una forma visual la comparativa de los hormigones fabricados con áridos reciclados y el HC a lo que se refiere a la resistencia a tracción a los 28 días. Es importante mantener niveles de resistencia ya que fabricamos hormigones de altas prestaciones.

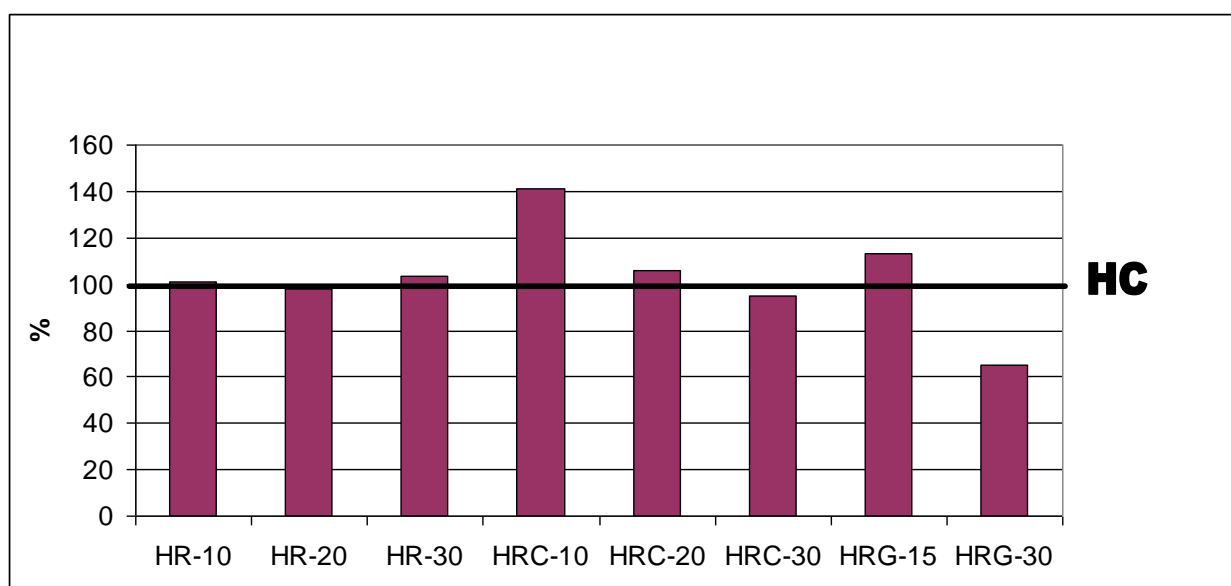


Figura 31. Gráfico comparativo a 28 días de todos los hormigones fabricados con árido reciclado y el hormigón convencional (en %)

Se puede observar que los valores de resistencia a tracción fueron similares al HC. Por lo que podemos concluir que no perdemos esta propiedad al fabricar hormigones con árido reciclado. El HRC-10 tenía un valor cercano al 140% en comparación con el HC. En cambio, el HRG-30 tiene cerca del 65% de la resistencia a tracción del HC.

No podemos concluir que haya una influencia directa de la resistencia a tracción a partir del porcentaje de arena reciclada que tiene el hormigón.



En el caso de la gravilla reciclada respecto al hormigón convencional, se puede observar una diferencia mayor. Al aumentar el porcentaje de gravilla reciclada, bajó mucho la resistencia a tracción. El HRG-15 está por encima de valor como el HC, pero el HRG-15 está muy por debajo, probablemente debido a la forma del árido.

4.3.2.3 Módulo de elasticidad

En el siguiente gráfico se compara el módulo de elasticidad a 28 días de los hormigones con áridos reciclados respecto al hormigón convencional.

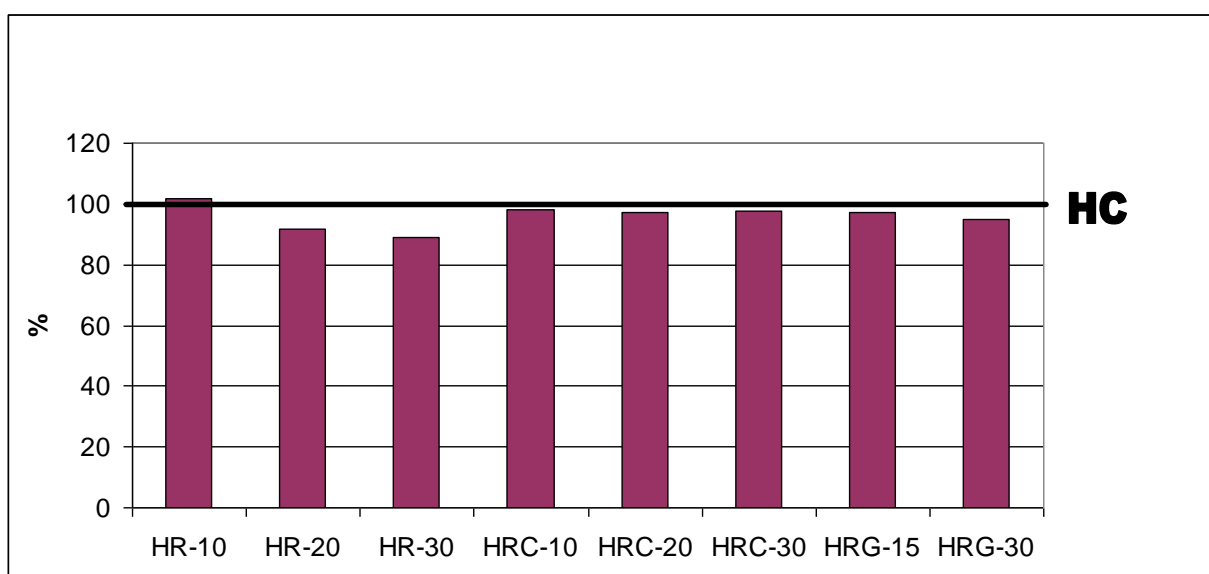


Figura 32. Gráfico comparativo a 28 días entre los hormigones fabricados con árido reciclado y el hormigón convencional

Tal y como se esperaba, a mayor cantidad de arena reciclada el módulo de elasticidad fue menor debido al incremento de la porosidad en el hormigón. Esta diferencia es más visible en los hormigones con arena reciclada mixta. La disminución más importante fue la del HR-30, disminuyendo más de un 10% respecto del HC del módulo de elasticidad. El HR-10 tenía un aumento del 101% del módulo de elasticidad.

Tal y como pasaba con la arena reciclada, con la gravilla reciclada el módulo de elasticidad se puede observar que también hubo una disminución respecto el HC en aumentar el porcentaje de sustitución de la gravilla reciclada en vez de la natural caliza. Aún así, los valores de módulo de elasticidad no distan mucho del HC.

4.3.3 Propiedades de durabilidad

4.3.3.1 Succión capilar

Los ensayos de succión capilar permiten observar la facilidad que tienen el hormigón para absorber agua desde la superficie. Para ello, a continuación se muestran en todos los gráficos, la evolución de la succión capilar de todos los hormigones al largo de las 72 horas de ensayo.

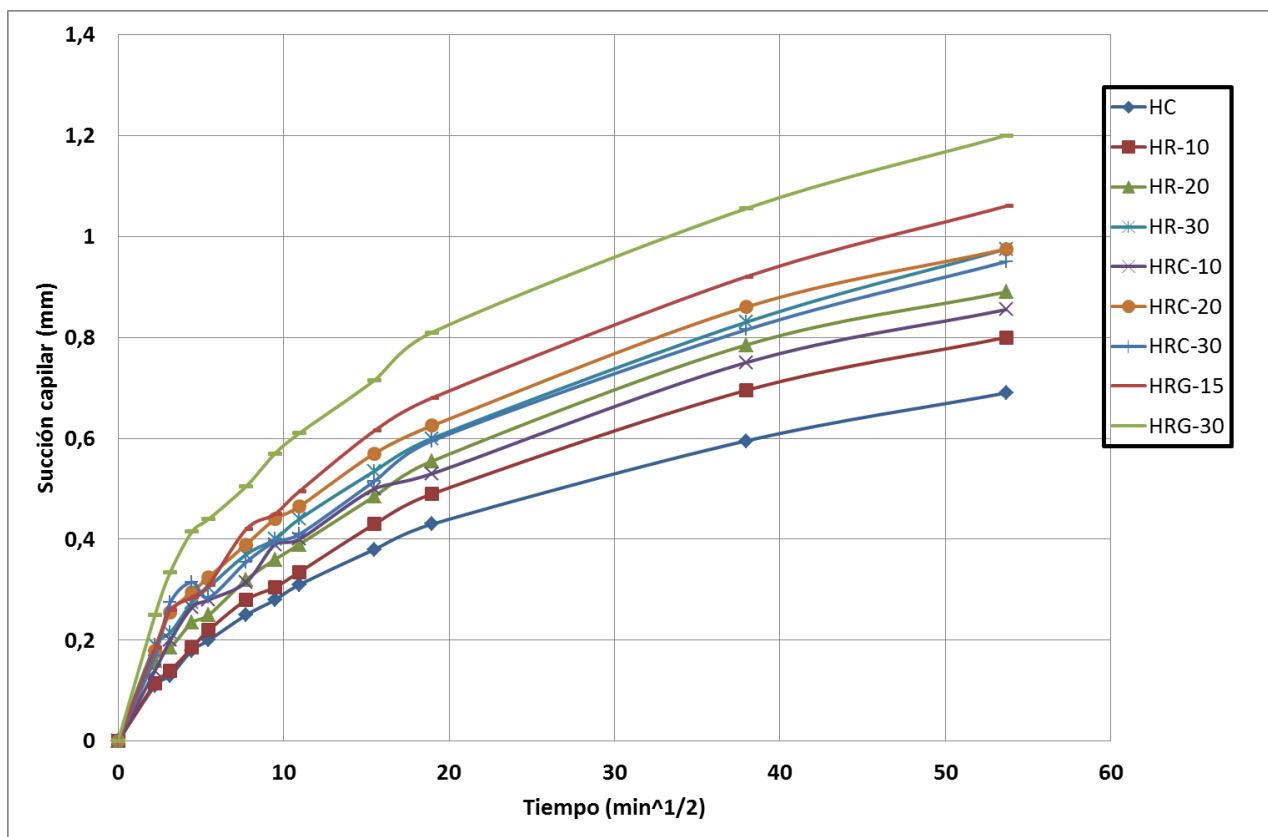


Figura 33. Resultados ensayo de succión capilar en todos los hormigones

En la tabla 17 se puede ver los coeficientes de succión obtenidos por cada uno de los hormigones. Se puede observar que los hormigones fabricados con el 15 y el 30 % de árido grueso mixto obtuvieron la mayor succión capilar. En general se puede decir que los valores obtenidos fueron bajos debido a la baja relación agua-cemento utilizado en los hormigones. De acuerdo a Neville [66], las primeras 4 horas podrías correlacionarse con la relación agua-cemento utilizadas. Los valores de $0.09 \text{ mm/min}^{1/2}$ y $0.17 \text{ mm/min}^{1/2}$ corresponden a hormigones con una relación agua-cemento de 0.4 y 0.6, respectivamente. Zhutovsky [77]



encontró que el coeficiente de succión entre 0.06 y 0.1 para hormigones con relaciones agua cementos de 0.33.

Tabla 18. Coeficientes de succión de todos los hormigones fabricados

	HC	HR-10	HR-20	HR-30	HRC-10	HRC-20	HRC-30	HRG-15	HRG-30
Coeficientes de succión (mm/min^{1/2})	0.0265	0.0292	0.0325	0.0361	0.0342	0.0388	0.0327	0.0414	0.0497

En general, la tendencia general es que los hormigones a mayor contenido de árido reciclado, mayor succión capilar. Este fenómeno es lógico y esperable, ya que los áridos reciclados tienen mayor absorción y volumen de poros que los áridos naturales, sin embargo los valores obtenidos fueron bajos, por lo que se puede asegurar un adecuado comportamiento en todos los hormigones.

4.3.3.2 Velocidad de impulsos ultrasónicos

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las velocidades de los impulsos ultrasónicos obtenidos tras ensayarlas a 28 días de edad.

Los datos se han extraído a partir de la mediana de las velocidades de impulsos ultrasónicos de dos probetas por tipo de hormigón y por dos caras distintas. Se hace así para poder tener datos representativos.

Tabla 19. Velocidad media de los impulsos ultrasónicos

NOMENCLATURA	VELOCIDAD DE IMPULSOS ULTRASÓNICOS [m/s]
HC	5000
HR-10	5021
HR-20	5008
HR-30	5025
HRC-10	5075
HRC-20	5055
HRC-30	4936
HRG-15	4798
HRG-30	4728



Excepto en los hormigones fabricados con árido grueso reciclado, que obtuvieron un UPV menor que el HC, los hormigones fabricados con arenas recicladas obtuvieron mayor UPV.

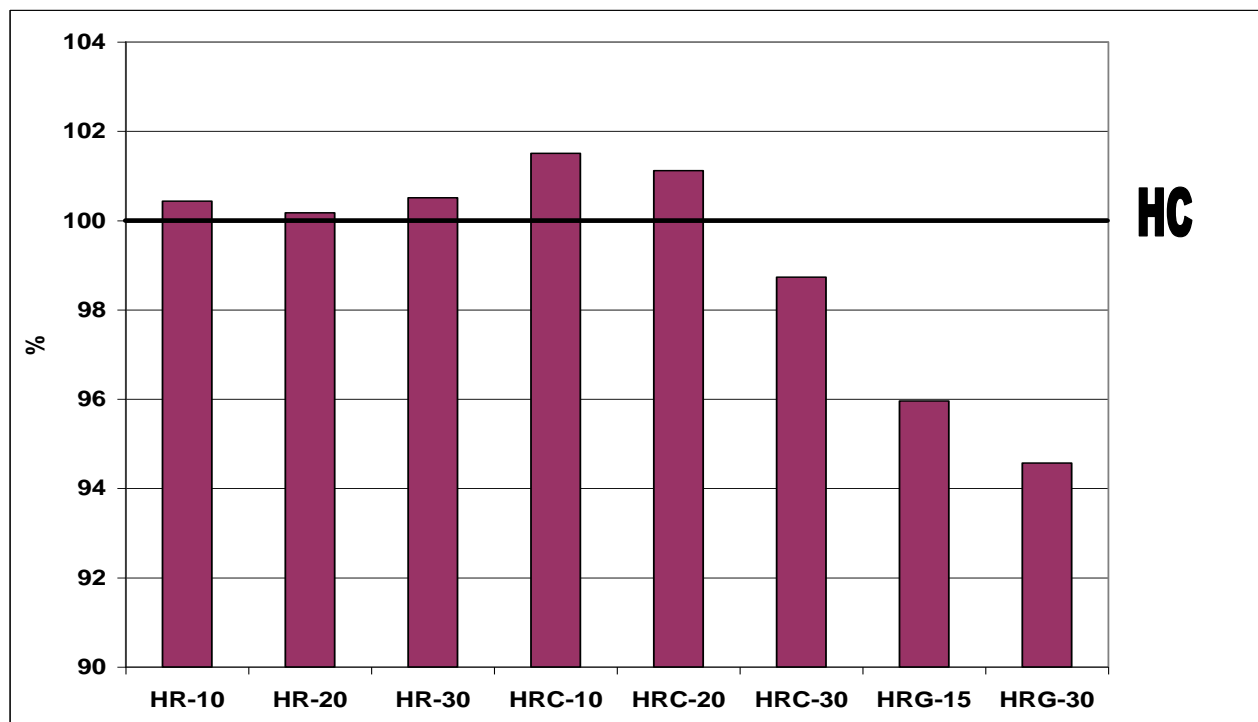


Figura 34. Gráfico comparativo entre todos los hormigones fabricados con áridos reciclados y el hormigón convencional

En todos los casos se puede observar que todos los hormigones cumplieron con el valor mínimo exigido para considerarse hormigones de calidad. Este valor mínimo es de 3000 m/s y lo sobrepasan todos. El mínimo exigido para que el hormigón sea de excelente calidad es de 4500 m/s. Y en este caso también lo sobrepasan todos los hormigones.

Se puede observar una pequeña disminución, ya que bajamos un 5% la velocidad, cuando analizamos la sustitución de la gravilla reciclada frente a la arena reciclada y hormigón convencional. Por lo que podemos decir que todos los hormigones eran de calidad excelente según este ensayo pero dentro de la categoría, los resultados muestran que era más favorable la sustitución de la arena reciclada e incluso el hormigón convencional que la sustitución de la gravilla reciclada.



Vemos que los valores de UPV de los hormigones fabricados con gravilla reciclada eran bastante menor, y menor que el HC. Indicaría una más baja calidad del hormigón. De acuerdo a otros trabajos de investigación [84, 85], el valor del UPV se reducía cuando el árido grueso natural fue sustituido por áridos reciclados.

Los hormigones fabricados con arena reciclado presentaron mayores UPV probablemente debido a que obtuvo densidades mayores en la nueva pasta, y una mejor interfase.

Se puede observar la ligera tendencia a que cuanto mayor era el porcentaje de árido reciclado, menor era la velocidad de los impulsos ultrasónicos, por lo que el árido reciclado lo dificultaba, debido a la porosidad.

4.3.3.3 Resistividad eléctrica

En la siguiente tabla se muestran los resultados a 28 días de edad de cada uno de los hormigones. Los resultados se obtuvieron con la media de dos probetas por cada hormigón y medida en dos caras de cada probeta.

Tabla 20. Valores de la resistividad eléctrica de cada tipo de hormigón [ohm·cm]

Hormigón	Resistividad eléctrica [ohm·cm]
HC	12805
HR-10	15777
HR-20	14380
HR-30	14242
HRC-10	13148
HRC-20	13021
HRC-30	13878
HRG-15	15300
HRG-30	17122

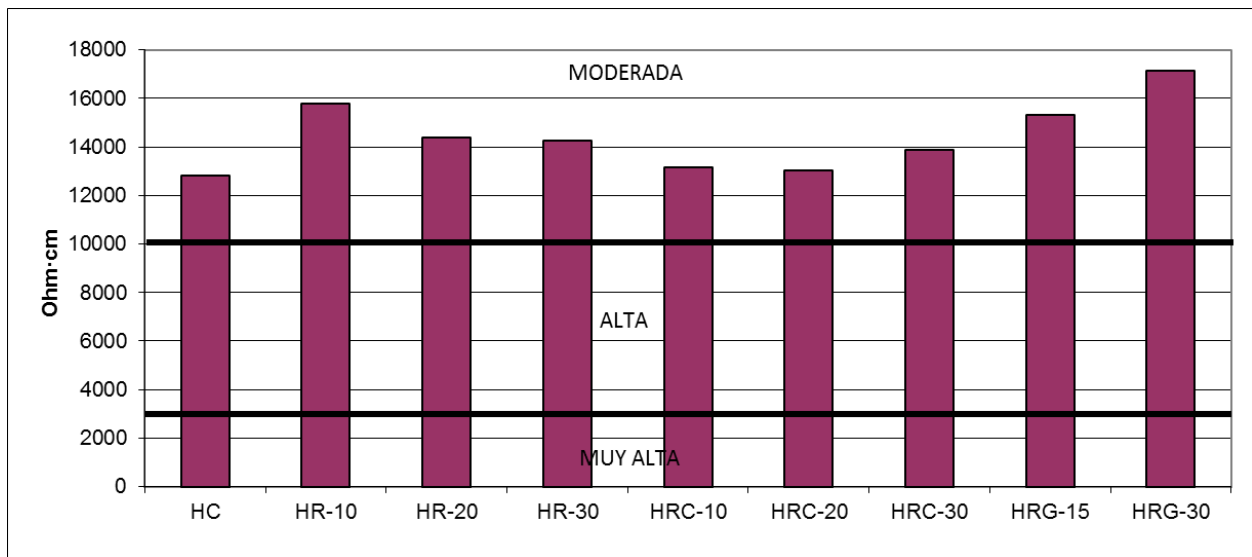


Figura 35. Resistividad eléctrica en todos los hormigones fabricados

Podemos observar que no hay una relación aparente entre la resistividad eléctrica por tipo de hormigón.

Vemos que los hormigones fabricados con gravilla reciclada tienen un valor más alto de resistividad. Aún así el grado de corrosión que podemos llegar es MODERADO en todos los hormigones, ya que estamos en el rango de entre 10.000 y 20.000 Ohm-cm. Esta propiedad se regula mejor utilizando un cemento con adiciones de cenizas volantes o escorias de alto horno [7, 86, 87]

A continuación se va a comparar el comportamiento del hormigón convencional con los hormigones con áridos reciclados en distintos porcentajes frente a la resistividad eléctrica. Para ello, se ha hecho una relación en tanto por ciento en relación al HC.

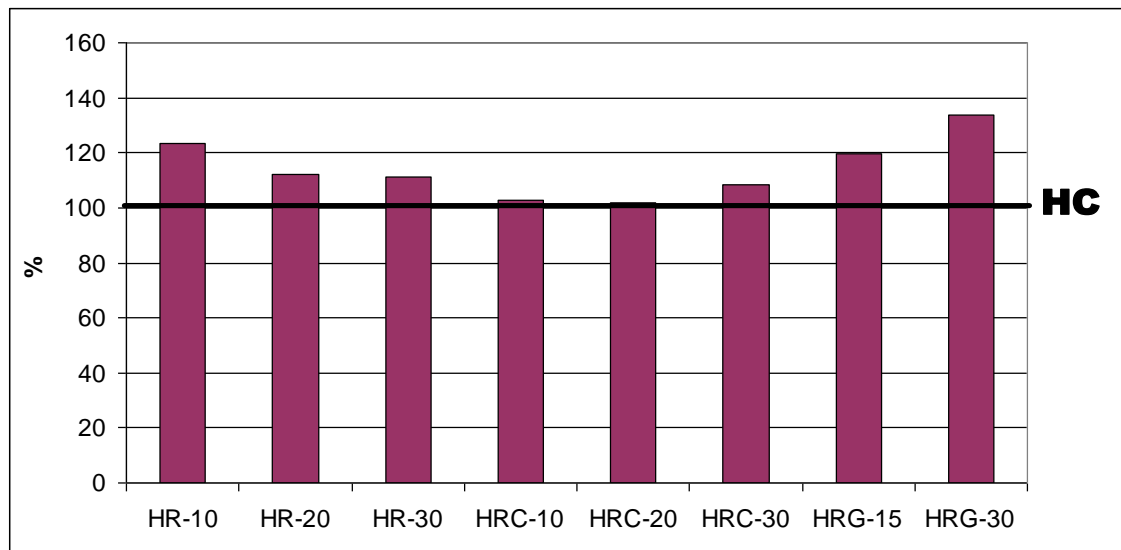


Figura 36. Gráfico comparativo entre todos los hormigones fabricados con áridos reciclados y el hormigón convencional

Podemos observar que todos los hormigones tenían un grado más elevado de resistividad eléctrica que HC, factor que va a favor de la calidad del hormigón. Ya que causará menos corrosión.

En general no se pueden extraer más conclusiones por porcentajes de sustitución y tipo de arena reciclada ya que los niveles de resistividad son muy parecidos y no responden a una tendencia concreta.

Podemos concluir entonces que en el caso del ensayo de resistividad eléctrica, todos los hormigones fueron favorables en cuanto a durabilidad. Siendo perfectamente sustituibles por el HC.

4.3.4 Retracciones

4.3.4.1 Retracción autógena

A continuación se muestran los resultados a 28 días de todos los hormigones. En el segundo gráfico se muestra de forma detallada las primeras 24 horas.

Los resultados se expresan en microdeformaciones.

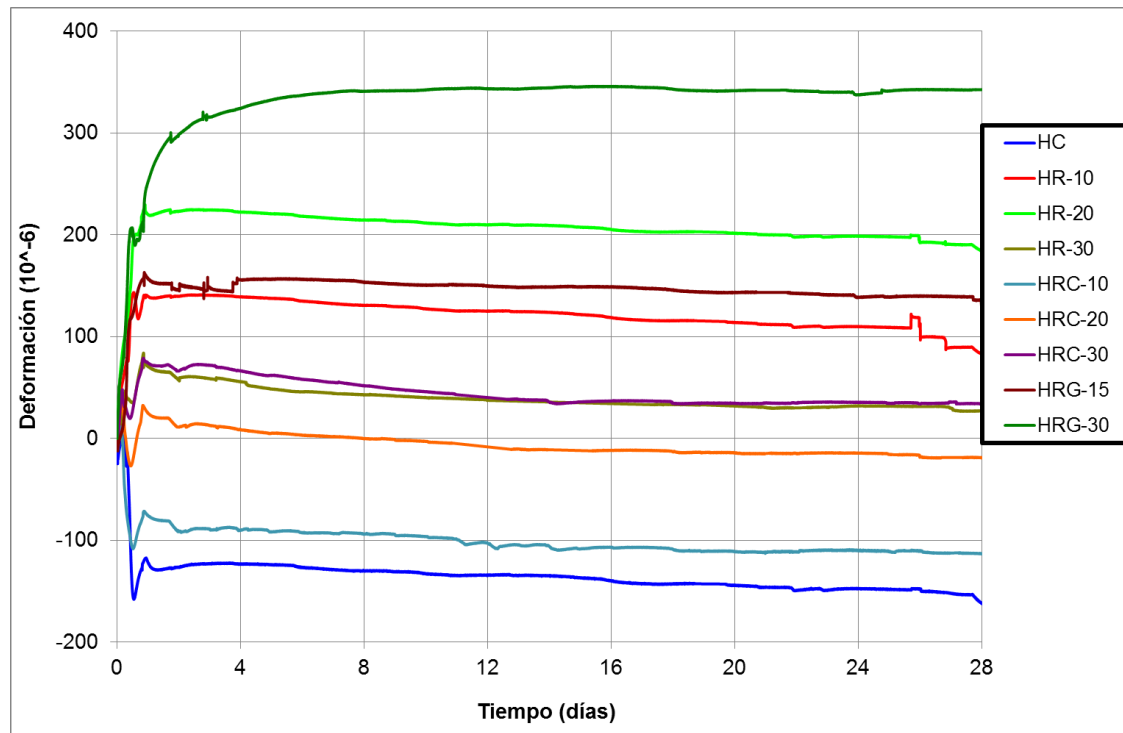


Figura 37. Gráfico comparativo de la retracción autógena de todos los hormigones a 28 días.

Las probetas estuvieron selladas durante todo el tiempo que estuvieron conectadas, no hubo contacto con el exterior y no hubo pérdida de agua. Eso significa que las deformaciones fueron consecuencias de reacciones químicas dentro del hormigón.

Tal y como se definió por Suzuki et al. [68] las mediciones se iniciaron una vez que el hormigón se colocó en los moldes.

El HC fue el hormigón que mayor retracción sufrió seguido por el hormigón HRC-10. Se puede decir que en el resto de los hormigones se pudo evitar las retracciones. De acuerdo a la tipología de los áridos y el porcentaje utilizado en esta fase experimental, se puede ver que en los hormigones fabricados con árido grueso reciclado sería suficiente utilizar el 15% del árido para evitar la retracción autógena, en los hormigones fabricados árido fino mixto, el 10% del árido sería suficiente cuando en hormigones fabricados con árido fino reciclado cerámico se necesitó el 20% del árido para conseguir que las retracciones desapareciesen.

Por cada tipo de árido reciclado utilizado, se puede decir que a mayor cantidad de árido utilizado menos fue la retracción obtenida, excepto en el HR-30.



Tal y como lo describe Zhutovsky [74, 77] y Suzuki [68] las retracciones dependerán de la cantidad de agua interna que presentan los áridos además de la distribución de los poros dentro del árido, siendo más difícil la difusión del agua cuando la dimensión de los poros es más pequeño. Los árido gruesos tienen mayores poros y mayor conectados entre ellos y los áridos finos tienen poros más pequeños y menos conectados entre ellos, por lo que los áridos reciclados gruesos trabajan menos, además de la diferencia que puede haber en la interfase, árido-pasta.

De acuerdo a los valores obtenidos se podría decir que la arena reciclada mixta sería suficiente en un 10%, la arena cerámica en un 25% y el árido gruesos probablemente en un 5-10%.

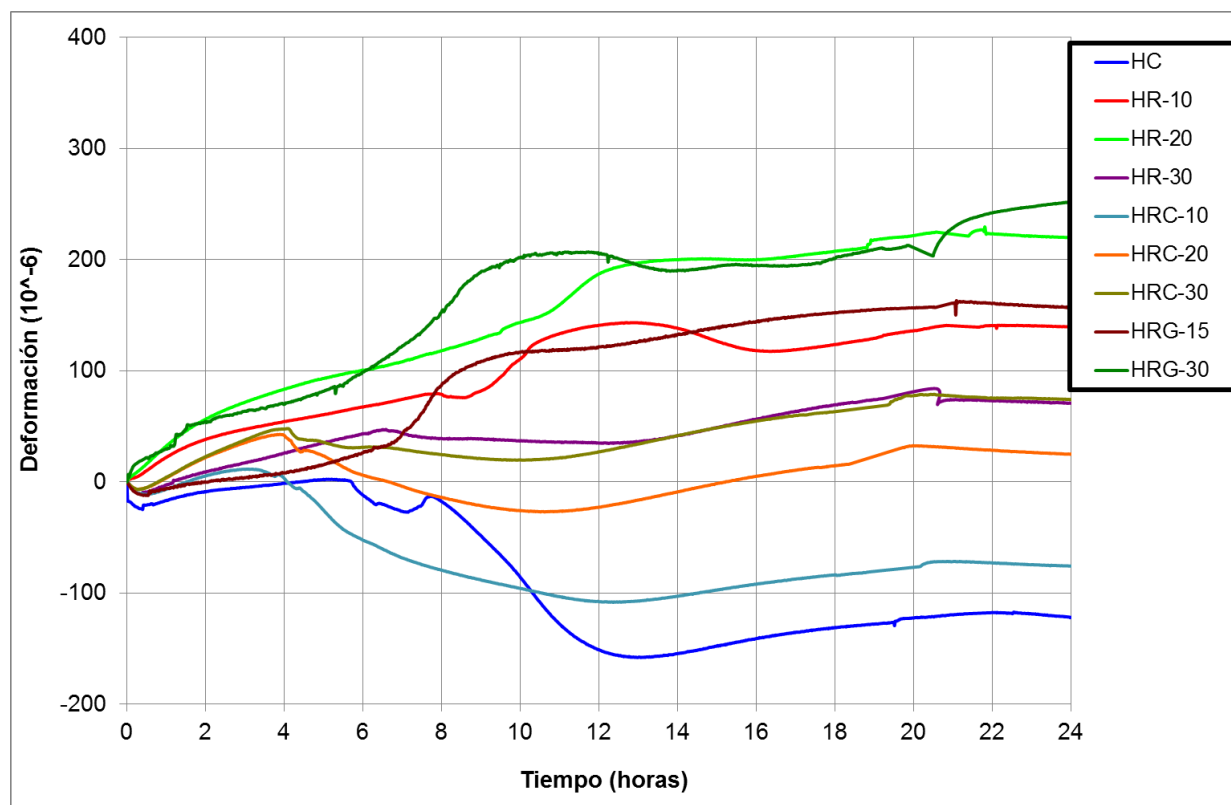


Figura 38. Gráfico comparativo de la retracción autógena de todos los hormigones. Detalle a las primeras 24 horas de fabricación.

Excepto el HC, el HRC-10 y el HRC-20 todos los hormigones tenían expansiones, que se mantuvieron a lo largo del tiempo. El HC fue el que más retracción tuvo, seguido del HRC-10. En el caso del HC, mantuvo una retracción aproximada de $125 \cdot 10^{-6}$ y en el caso del HRC-10 mantiene una deformación de $100 \cdot 10^{-6}$. El HRC-20 obtuvo una retracción muy pequeña, casi inexistente.



Todos los demás hormigones tienen expansión, pero el que más tenía fue el HRG-30, por su alto contenido en agua y que probablemente fue transportado hacia la pasta a los largo del tiempo. Se puede observar que el HRG-30 fue el hormigón que tenía una deformación de unos $350 \cdot 10^{-6}$. Era el hormigón que tenía la mayor deformación en forma de expansión. Al no tener contacto con el exterior, el agua de los áridos que no reaccionaron con el cemento, ha podido ir desprendiéndose, ayudando al curado interno en el hormigón. Después se tiene el HR-20 y el HR-30.

Se pueden observar que el HC y el HRC-10 casi no tenían la expansión inicial debido a la hidratación del cemento. Todos los demás hormigones se puede observar que la tendencia inicial es a la expansión debido a la hidratación del cemento, ya que es cuando se produce la etringita. Esta es un sulfoaluminato de calcio hidratado que se forma durante las primeras etapas de hidratación del cemento Portland a partir de la reacción de la fase aluminato del Clinker.

Los hormigones HC, HRC-10 y el HRC-20 han sufrido de forma global una retracción. Por lo que podemos asegurar que no sería suficiente una sustitución del 20% de árido reciclado fino cerámico. Eliminamos completamente la retracción autógena con el hormigón HRC-30 como podemos observar en los gráficos anteriores. Eso es debido a la eliminación de la tensión capilar interna, gracias al curado interno del hormigón [68].

En el caso de los hormigones fabricados con árido reciclado fino mixto, fue suficiente una sustitución del 15% de árido reciclado por árido natural para evitar completamente la retracción autógena. Eso puede ser debido a que estos tipos de áridos tienen mayor capacidad de absorción y mayor volumen de poros, ayudando al paso del agua en la fase de curado interno.

Los hormigones HR-10, HRG-15 Y HR-20 eran los que a primeras horas tenían una mayor expansión, debido a la reacción de hidratación. Luego tenían una pequeña retracción, luego otra expansión y se mantenían con una deformación positiva absoluta. En el caso del HR-20, por ejemplo, se mantenía casi estable en los $200 \cdot 10^{-6}$.

Suzuki [68] en su investigación halla que empieza a reducirse la retracción autógena en hormigones con sustituciones de a partir del 20% de árido reciclado grueso cerámico y se elimina del todo con una sustitución del 40%. Esta fabricación la hizo con una relación agua/cemento del 0.15.



A partir de la octava hora todos los hormigones tienen la tendencia a estabilizarse. Esta estabilidad la consiguen de una forma más estricta a partir del día 12 tal y como podemos observar.

Erika Holt [83], en su investigación añade que no es posible eliminar totalmente la retracción autógena y comenta que son muy importantes a edades tempranas. En nuestro caso a edades tempranas se ha eliminado casi en su totalidad la retracción autógena en todos los hormigones, siendo el hormigón convencional el que más retracción tenía. Holt asegura que la mejor manera de hacer un curado es con técnicas de mojado inmediatamente después de la fabricación.

Los resultados indican que el árido reciclado grueso como los finos, tienen potencial para producir un curado interno y se podrían utilizar para a producción de hormigones de altas prestaciones con mínimas retracciones autógenas. Esto mismo pude llevar a conseguir en los hormigones resistencia a compresión elevadas y un incremento de la resistencia de 7 a 28 mayores que en el hormigón convencional.

4.3.4.2 Retracción por secado

Como se ha explicado, este ensayo estaba compuesto por el ensayo con probetas prismáticas y mediciones de pesos y longitudes de forma manual con el comparador y por otro lado con probetas cilíndricas de 150 x 300 cm y mediciones con el sistema de adquisición de datos conectada a una fuente de alimentación y las galgas introducidas dentro del hormigón a través del molde.

La primera figura es el resultado de la toma de datos por las galgas conectadas al sistema de adquisición de datos.

Todas las mediciones se realizaron hasta los 50 días excepto los hormigones HRG15 y HRG-30, solo se pudieron ensayar hasta los 28 días. En el caso del HRC-10 se tuvo un problema en la medición de la probeta.

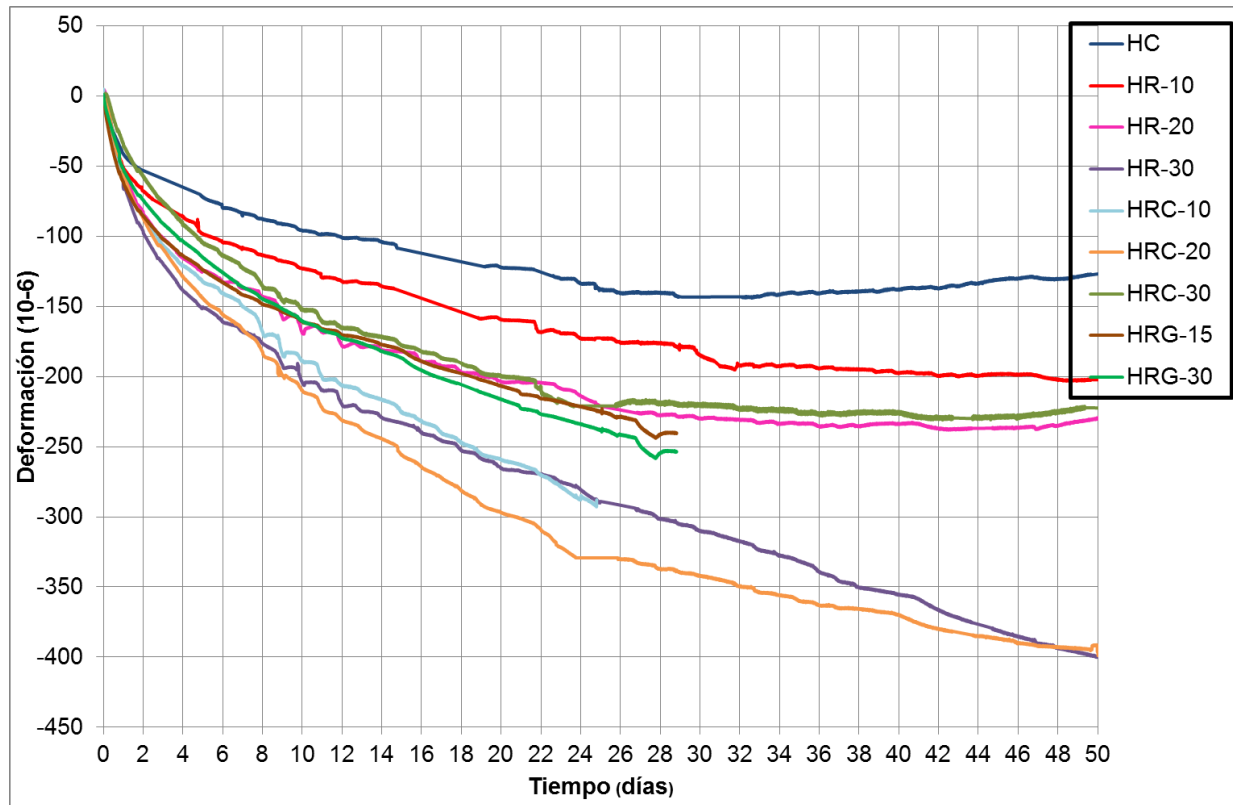


Figura 39. Gráfico comparativo de la retracción por secado de todos los hormigones a los 28 o 50 días de edad. Obtención de datos por galgas.

En este ensayo, las deformaciones fueron empezadas a medir a partir de las 72 horas de fabricar (24 horas en los moldes + 48 horas sumergidas en agua), cuando las probetas fueron introducidas en la cámara climática a 20° C y 50% de humedad

Se puede observar que el hormigón HC sufrió la menor retracción por secado, siendo el hormigón con menor cantidad de agua.

De acuerdo a las mediciones realizadas por las galgas embebidas en las probetas (figura 39), y las mediciones realizadas manualmente en las probetas prismáticas, se puede decir que a medida que los hormigones fabricados con arena reciclada cerámica tuvieron mayor retracción por secado que los hormigones fabricados con arena recicladas mixtas, excepto el HRC30. El secado de la pasta de cemento de los hormigones fabricados con arena cerámica fue mayor, debido a la dificultad que esta tenía de transportar agua a la pasta.

El HRC30, con 30% de arena cerámica distribuida por el hormigón, aportó suficiente agua a la pasta (probablemente la adecuada distribución de la arena cerámica) para que la retracción de secado fuese adecuado.



De acuerdo a Topçu y Bilir [88] la retracción por secado incrementa aumentando la capacidad de absorción de agua de los áridos finos cerámicos cuando estos son utilizados en la fabricación de morteros. Sin embargo, este comportamiento no se puede afirmar cuando estas arenas reciclados son utilizadas en la fabricación de hormigones.

Por otra parte, de acuerdo con Claudio [89], los hormigones fabricados con 20 y 30% de arena reciclada en sustitución a la arena natural, utilizando en todos los hormigones la misma cantidad de agua total, y por lo tanto siendo una relación agua-cemento efectiva menor en los hormigones reciclados, a los 180 días la retracción de secado fue similar o menor al sufrido por un hormigón convencional.

En los hormigones fabricados con árido grueso reciclado, se puede ver en la figura 39 la deformación por secado fue más baja con algunos hormigones fabricados con arena reciclada, pero en la figura 40 se puede ver que el HRG-30, debido a su alta cantidad de agua fue el hormigón que mayor retracción sufrió.

Los autores consideran que los datos tomados manualmente en las probetas prismáticas son mejores debido a que se analiza las mediciones de un elemento completo y de mayor longitud. La tendencia de los resultados obtenidos fue similar a los obtenidos por otros investigadores [90, 91].

Los hormigones HR10 HR30 y HRG15 fueron de acuerdo a los diferentes tipos de áridos los que menor retracción por secado obtuvieron

El segundo gráfico es el resultado del gráfico que se ha hecho con las medidas manuales que se han ido haciendo tanto de peso como de longitud de las probetas prismáticas.

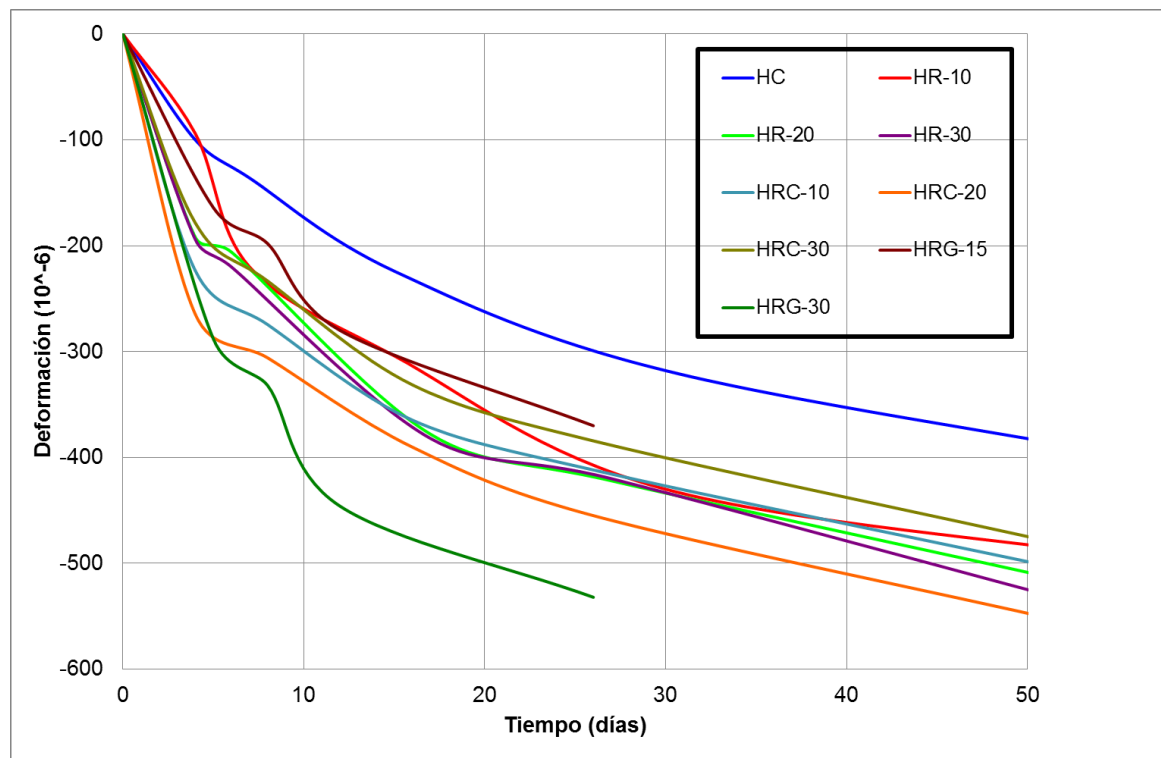


Figura 40. Gráfico comparativo de la retracción por secado de todos los hormigones a los 50 días de edad. Obtención de medidas manuales.

Después de analizar la deformación con las galgas, podemos observar el anterior gráfico que esta medido manualmente. Si nos fijamos vemos que hay pequeñas diferencias que con las galgas pero se debe tener en cuenta el error que se puede cometer al medir manualmente.

En el caso de las medidas manuales, el valor de las deformaciones fueron mayores, posiblemente por tener menos precisión en la medida. Además la norma, con este método, marca menos mediciones a hacer, teniendo un gráfico menos riguroso.

Tal y como se ha dicho con el gráfico de retracción por secado con las galgas, el que menos deformación tenía fue el HC. En este caso, el que mayor deformación tuvo según las mediciones manuales, fue el HRG-30, que es el que tenía más agua.

El tercer gráfico es la relación entre el tiempo y la pérdida de peso de las probetas en 50 días.

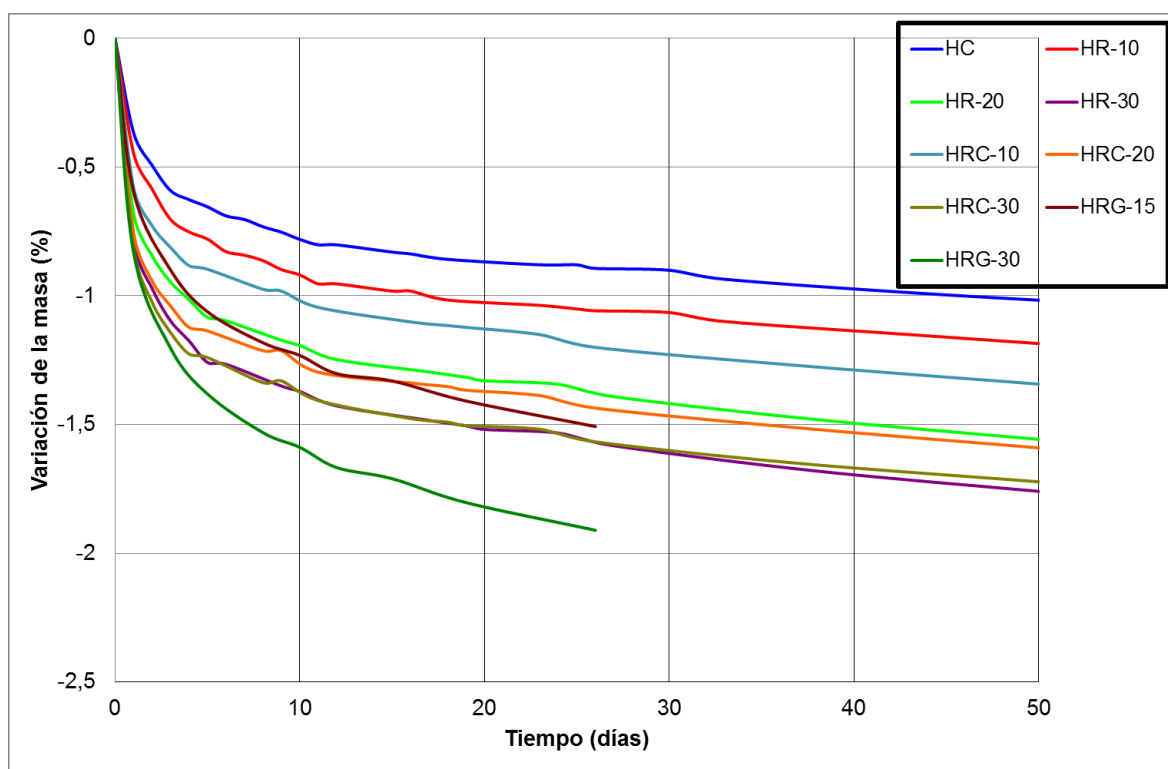


Figura 41. Gráfico comparativo de la variación de la masa en el ensayo de retracción por secado de todos los hormigones a los 50 días de edad. Obtención de medidas manuales.

Podemos observar que la menor deformación fue el del HC, ya que era el hormigón que tenía menos agua. En el caso del HRG-30 es uno de los que tenía más agua y por eso la variación fue mayor. Se puede observar que la variación de la masa ha sido casi paralela en todos los hormigones y ha seguido la misma trayectoria con pequeños desfases. De forma global la variación de la masa va relacionado con la cantidad de agua que tenía el hormigón.

En resumen, se puede ver que el hormigón de menor cantidad de agua total, el hormigón HC, fue el que menor reducción del peso sufre. Y a medida que el agua total del hormigón incrementaba la pérdida de peso también incrementó, siendo el hormigón HRG-30 el que mayor reducción del peso sufrió.

La caída más importante de la masa se producía en los primeros 3 días después de la fabricación del hormigón, donde estos perdían entre el 0.7% y el 1.3% de su masa. Después se suavizaba la pendiente.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Después de haber terminado la fase experimental y el análisis de los resultados, se recogen en este capítulo las conclusiones pertinentes a cada uno de los apartados estudiados en el capítulo anterior.

5.1 ÁRIDO

5.1.1 Árido natural

- El árido natural utilizado para las fabricaciones de los hormigones cumplían con todos los requisitos exigidos por las normas ASTM C 33 y EHE-08, que regulan las exigencias mínimas de los áridos finos y gruesos para los hormigones con altas resistencias.

5.1.2 Árido reciclado

- Los áridos reciclados utilizados, de composición mixta y cerámica, cumplían con las exigencias, de acuerdo a la granulometría que presentan, de la norma ASTM C 33 y EHE-08 que regulan las exigencias mínimas para los áridos en los hormigones con altas resistencias. Sin embargo todos los áridos reciclados presentaban una mayor capacidad de absorción requerida.

5.2 HORMIGÓN

5.2.1 Hormigón fresco

- La utilización del árido reciclado en estado húmedo en un 90% respecto a su capacidad de absorción, permite controlar con facilidad la trabajabilidad el hormigón con árido reciclado. No necesitando utilizar más cantidad de aditivo súper plastificante al utilizado en el hormigón convencional.



- La densidad de todos los hormigones fue similar. La sustitución hasta el 30% de arena natural por arena mixta o cerámica, produce en menos del 3% la densidad del hormigón respecto al del hormigón convencional. Resultado similar se obtiene cuando se sustituye el árido grueso natural en un 30% por árido reciclado mixto.
- Todos los hormigones fabricados con áridos reciclados obtuvieron una retracción plástica inferior al hormigón convencional, debido a la aportación del agua existente en los áridos reciclados. De esta manera favoreciendo la aportación a la pasta de cemento y reduciendo su retracción plástica.
- Los hormigones fabricados con 15% y 30% de árido reciclado grueso obtuvieron la menor retracción plástica, probablemente debido a que es más fácil la salida y el transporte del agua en los áridos grueso que en árido cerámicos. La retracción plástica podría hacer que desapareciera con un 20% de árido reciclado grueso mixto.
- Los hormigones fabricados con árido fino mixto sufrieron menores retracciones que los hormigones fabricados con árido fino cerámico, probablemente debido a que tienen mayor facilidad de movimiento del agua. Los hormigones fabricados con 30% de árido reciclado obtuvieron las menores retracciones.

5.2.2 Hormigón endurecido

5.2.2.1 Propiedades físicas

- La densidad de los hormigones con áridos reciclados (cuando se utiliza como máximo un 30% de árido reciclado en sustitución al árido natural) es similar a la del hormigón convencional. La absorción se incrementa hasta un 15- 20% cuando se utiliza el árido reciclado mixto. Sin embargo los hormigones fabricados con arena cerámica reduce la absorción respecto al del HC.

5.2.2.2 Propiedades mecánicas

- La resistencia a compresión de los hormigones fabricados con el 10, 20 o 30% de arena reciclado supera al del hormigón convencional. La utilización del 30% de áridos grueso reciclado produce una reducción del 5% a los 28 días de edad.



- El incremento de la resistencia a compresión de 7 a 28 días de los hormigones fabricados con áridos reciclados es mayor que el incremento presentado por el hormigón convencional.
- Los valores de las resistencias a compresión cumplen con las exigencias de los hormigones de Altas Resistencias que marca la EHE-08.
- En cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, no se perciben muchas variaciones, no pudiendo sacar ninguna conclusión. La resistencia a tracción del hormigón fabricado con árido reciclado es similar al hormigón convencional.
- El hormigón fabricado con el 30% de arena reciclada mixta sufre la mayor reducción del módulo, no superando nunca el 10% respecto al del hormigón convencional.
- Se puede concluir que los hormigones fabricados utilizando hasta el 30% de arena reciclado en sustitución a la arena natural obtienen similares propiedades mecánicas que un hormigón convencional de alta resistencia.

5.2.2.3 Propiedades de durabilidad

- Respecto a la succión, se puede decir que los hormigones fabricados con el 15 y el 30 % de árido grueso mixto obtuvieron la mayor succión capilar y que el hormigón convencional es el del menor coeficiente de succión. Todos los hormigones tienen valores bajos debido a la baja relación agua-cemento utilizada. Cumplen con las condiciones de hormigones de altas resistencias.
- Los hormigones fabricados con arena reciclado presentaron mayores UPV probablemente debido a que obtuvo densidades mayores en la nueva pasta, y una mejor interfase. Todos los hormigones fabricados con árido reciclado fino, excepto el hormigón fabricado con el 30% de árido reciclado cerámico HRC-30, tuvieron una mayor velocidad de los impulsos ultrasónicos que el hormigón convencional.
- Todos los hormigones obtienen una calificación de riesgo moderado frente a la corrosión, a partir del ensayo de resistividad eléctrica. Se ha visto que las cenizas volantes han ayudado a mejorar este nivel.



- De acuerdo a los ensayos realizados, se puede decir que los hormigones fabricados utilizando como máximo el 30% de árido fino reciclado obtienen similar propiedades al hormigón convencional de alta resistencia.

5.2.2.4 Retracciones

- Respecto a la retracción autógena, se puede concluir que tanto los áridos reciclados finos como los gruesos tienen capacidad de reducir la retracción debido a la aportación a la pasta del agua absorbida que lleva, una necesidad en hormigones de altas prestaciones. Además esto mismo puede llevar a conseguir en los hormigones resistencia a compresión elevadas y un incremento de la resistencia de 7 a 28 mayores que en el hormigón convencional.
- De acuerdo a los valores experimentales obtenidos se podría decir que para evitar la retracción autógena en un hormigón con árido reciclado sería suficiente con un 10 % de la arena reciclada mixta, 25% de la arena reciclada cerámica o un 5-10% de gravilla reciclada.
- Respecto a las retracciones de secado, el hormigón convencional obtiene la menor retracción y el HRG-30 el mayor. De acuerdo a los hormigones fabricados con arena reciclada: en general los hormigones fabricados con arena mixta reciclado obtiene menores retracciones que los hormigones fabricados con arena cerámica. La retracción de secado va aumentando al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Excepto en el HRC-30, con 30% de arena cerámica, que debido a la adecuada distribución del los áridos por la pasta, la retracción por secado no es muy alta.
- La variación de la masa en el ensayo de retracción por secado también fue mayor en cuanto mayor fue el porcentaje de árido reciclado. En este caso, entonces, el hormigón convencional fue la que menos variación de la masa tuvo.



5.3 CONCLUSIONES GENERALES

Después de ver los resultados de los ensayos realizados, se puede concluir que los hormigones fabricados con áridos reciclados mejoran las retracciones, sin disminuir las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad. Este hecho hace que la fabricación de estos hormigones reciclados sean aptos para las construcciones que exijan altas resistencias, cumpliendo todas las normativas para su uso.

5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las futuras líneas de investigación que darían continuidad al estudio del hormigón de altas prestaciones con árido reciclado, estarían dedicadas a ampliar el estudio con otras propiedades que en este estudio no se han llegado a estudiar.

Se podría abrir una nueva vía, y optimizar mejor los porcentajes de sustitución de los áridos reciclados tanto finos como gruesos. De esta manera quizás se podría llegar a la dosificación óptima y se paliarían los problemas que pueda tener la fabricación con áridos reciclados, sin dejar de perder calidad con los áridos naturales calizos.

En continuidad con los ensayos de durabilidad, se podrían realizar ensayos de hielo-deshielo, carbonatación, de resistencia a la penetración de cloruros o reacciones álcali-árido.

Otro camino posible sería obtener resultados a más largo plazo, observando los resultados a largas edades y estudiando el comportamiento, viendo de esta manera si a largas edades los resultados también son satisfactorios.

Es posible abrir nuevas vías de investigación para los hormigones de altas prestaciones con árido reciclado con diferentes tipos de adiciones, como con humo de sílice o con escorias de alto horno y comparar los resultados entre ellos, observando si se puede incrementar aún más las resistencias y las propiedades en general.



**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE HORMIGONES
DE ALTAS RESISTENCIAS FABRICADOS CON
RESIDUOS MIXTOS Y CERÁMICOS**





REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Planta de reciclaje de residuos de construcción y demolición. Consulta el 14 de Noviembre de 2013. www.aproindorcds.com
- [2] Miguel Angel Gutiérrez Fernández, dctr Arquitecto. "Hormigones de Altas Prestaciones". Consulta el 28 de Noviembre del 2013.
http://dspace.unav.es/dspace/bitstream/10171/16552/1/RE_Vol%2015_11.pdf
- [3] Tsung-Yueh Tu a, Yuen-Yuen Chen b, Chao-Lung Hwang:"Properties of HPC with recycled aggregates" Cement and Concrete Research 36 (2006) 943–950
- [4] ACI Committee 363, State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI 363R-92, reapproved 1997.
- [5] Materiales de Construcción. Consulta el 15 de Diciembre de 2013.
http://oa.upm.es/11669/2/Materiales_de_construcci%C3%B3n.Criterios_de_sostenibilidad_y_desarrollo.pdf
- [6] Residuos de construcción y demolición. "Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias" Consulta el 31 de Diciembre de 2013. Pág. 3. <http://www.cedexmateriales.vsf.es..>
- [7] O. I. Molina Bas, A. Moragues Terrades y J. C. Gálvez Ruiz: "La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del ión cloruro y del dióxido de carbonoes de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 2 (2008).
- [8] Hugo Costa, Eduardo Júlio, Jorge Lourenço,! New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete!, Construction and Building Materials 35 (2012) 84–91.
- [9] Holm TA, Bremner TW. State-of-the-art report on high-strength, high durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. Washington: US Army Corps of Engineers – ERDC/SL; 2000.
- [10] Costa H. Mix-design and mechanical characterization of structural lightweight aggregate concrete. University of Coimbra: MSc thesis; 2008 [in Portuguese].



- [11] Jensen OM, Hansen PF. "Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume modified cement paste". ACI Mater J 1996;93(6):539–43.
- [12] EuroLightCon. "Evaluation of the early age cracking of lightweight aggregate concrete". BE96-3942/R19; 2000.
- [13] Bisschop J, Lura P, Van Mier JGM. "Shrinkage microcracking in cement-based materials with low water–cement ratio". Concr Sci Eng 2001;3:151–6.
- [14] Hammer TA. "Early age cracking risk of high-strength lightweight aggregate concrete" (SP234-40). ACI Spec Pub 2006; 234:641–60.
- [15] Bentz DP, Geiker MR, Hansen KK. "Shrinkage-reducing admixtures and early age desiccation in cement pastes and mortars". Cem Concr Res 2001;31:1075–85.
- [16] Weiss J, Lura P, Rajabipour F, Sant G. "Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages". ACI Mater J 2008;105(5):478–86.
- [17] Weber S, Reinhardt HW. "A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing". Adv Cem Based Mater 1997;6:59–68.
- [18] EuroLightCon. "Long-term effects in LWAC: strength under sustained loading, shrinkage of high strength LWAC". BE96-3942/R31; 2000.
- [19] Bentur A, Igarashi S, Kovler K. "Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates". Cem Concr Res 2001;31(11):1587–91.
- [20] Lura P, van Breugel K, Maruyama I. "Autogenous and drying shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete at early ages" – the effect of specimen size. In: Proc int conf early-age cracking in cementitious systems. RILEM; 2001. p. 337–44.
- [21] Zhutovsky S, Kovler K, Bentur A. "Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage". Mater Struct 2002;35 (246):97–101.



- [22] Lopez M. "Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: a multi-scale investigation". Georgia Institute of Technology, PhD thesis; 2005.
- [23] Lura P. "Autogenous deformation and internal curing of concrete". Delft Institute of Technology, PhD thesis; 2003.
- [24] EuroLightCon. "The effect of the moisture history on the water absorption of lightweight aggregates". BE96-3942/R20; 2000.
- [25] Zhang MH, Gjrv OE. "Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste". Cem Concr Res 1990;20(4):610–8.
- [26] Lura P, Bisschop J." On the origin of eigenstresses in lightweight aggregate concrete". Cem Concr Compos 2004;26:445–52.
- [27] Yang Yanga, Ryoichi Satob, Kenji Kawai, "Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages" Cement and Concrete Research 35 (2005) 449–456
- [28] Alexander, K.M; Bruere, G.M ; and Ivanusec "The creep and related properties of very high strength superplasticized concrete" , Cement and concrete Research, V, 10, N 2, Mar 1980 pp 131-137.
- [29] R.K. Dhira, K.A. Paine, J. de Brito, M. Etxeberria, N.Y. Ho, C.S. Poon, V.W.Y. Tam: "Use of recycled and secondary aggregates in concrete: an overview (2011).
- [30] José Mora-Ruacho , Ravindra Gettu , Antonio Aguado, "Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete" Cement and Concrete Research 39 (2009) 141–146
- [31] Shah, S. P., and Weiss, W. J., (2000) "High Strength Concrete: Strength, Permeability, and Cracking," Proceedings of the PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete, Orlando Florida, © 2000, pp. 331-340
- [32] Jianyong Li, Yan Yao, "A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete" Cement and Concrete Research, 2001, p 1203-1206.



- [33] B. Person, "Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete" *Cement and Concrete Research*, July 1998, Pages 1023–1036.
- [34] Hendriks, Ch.: *The Building Cycle*. Aeneas Tech.Pbl.The Netherlands, (2000)
- [35] M. C. Limbachiya, T. Leelawatand R. K. Dhir:"Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete"
- [36] Andrzej Ajdukiewicz, Alina Kliszczewicz : "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HSC" (2002)
- [37] Chi Sun Poon & Dixon Chan," Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick". *Construction and Building Materials* 20 (2006) 569–577
- [38] Hanifi Binici," Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties". *Construction and Building Materials* 21 (2007) 1191–1197.
- [39] Paulo B. Cachim, "Mechanical properties of brick aggregate concrete". *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1292–1297.
- [40] F. Pacheco-Torgal & S. Jalali, "Reusing ceramic wastes in concrete". *Construction and Building Materials* 24 (2010) 832–838
- [41] RM. Senthamarai & P. Devadas Manoharan, "Concrete with ceramic waste aggregate". *Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 910–913.
- [42] RM. Senthamarai, P. Devadas Manoharan & D. Gobinath, "Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties". *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2413–2419
- [43] Pincha Torkittikul & Arnon Chaipanich, "Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes". *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 440–449
- [44] Jian Yang, Qiang Du & Yiwang Bao, "Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks". *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1935–1945.



- [45] Eva Vejmelkova, Martin Keppert, Pavla Rovnanikova et al. "Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material". *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 55–61.
- [46] Ali Heidari & Davoud Tavakoli, "A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles". *Construction and Building Materials* 38 (2013) 255–264
- [47] Masahiro Suzuki, Mohammed Seddik Meddah & Ryoichi Sato, "Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete". *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 373–381.
- [48] Wonchang Choi, Hyun-Do Yun, Sun-Woo Kim: "Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams" (c. 2009).
- [49] Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M.: "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Research* 37 (2007), pp. 735–742
- [50] TAM V.W.Y., GAO X.F. TAM C.M., "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1195–1203
- [51] Kikuchi, K., Yasunaga, A. and Ehara, K., "The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete", *Proceedings of 3rd Int. RILEM Symp. Demolition and Reuse of Concrete & Masonry*, Odense, Denmark (E & FN Spon, London, Oct. 1993) 367-377.
- [52] Ravindrajah, S. R., Loo, Y. H. and Tam, C. T., "Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests" *Mater. Struct.* 21 (1988) 289-295.
- [53] Tsung-Yueh Tu, Yuen-Yuen Chen, Chao-Lung Hwang., "Properties of HPC with recycled aggregates". *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 943–950.
- [54] M. C. Limbachiya, T. Leelawat and R. K. Dhir, "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete" *Materials and Structures*, 33 (November 2000) 574-580.



- [55] Andrzej Ajdukiewicz, Alina Kliszczewicz, "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC". *Cement & Concrete Composites*, 24 (2002) 269–279.
- [56] Acker, Van A., "Recycling of concrete at a precast concrete plant: Part 1", *FIP notes* (1997/3) 3-6.
- [57] Khaldoun Rahal: "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, *Bulding and Environment*, Volume 42, Issue 1, January 2007, Pages 407-415 (2005).
- [58] L.Butler, J.S. West, S.L. Tighe: "The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement", *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 10, October 2011, Pages 1037-1049 (2011).
- [59] Qiong Liu, Jianzhuang Xiao, Zhihui Sun: "Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete", *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 10, October 2011, Pages 1050-1057 (2011).
- [60] C. Thomas, J. Setiéna, J.A. Polanco , P. Alaejos , M. Sánchez de Juan, "Durability of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials* 40 (2013) 1054–1065
- [61] ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias). Entidad estatal que gestiona las infraestructuras (vías, estaciones y señalización entre otros) cobrando un canon a las empresas usuarias de la red.
- [62] S.C Kou, C.S. Poon, DixonChan, "Influence of flyash a cement addition o the hardened properties of recycled aggregate concrete", *MaterStruct* (2008) 41:1191-1201
- [63] M.L.Berndt, "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate", *Construction Building Materials* 23 (2009) 2606-2613
- [64] Sami W. Tabsh, Akmal S. Abdelfatah: " Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 1163-1167 (2008).
- [65] Marco Gomes, Jorge de Brito: "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance" (2008).



- [66] A.M. Neville, Properties of Concrete, Longman 981-4053-56-2, 2000 by Pearson Education Asia.
- [67] F.D. Lydon, R.V. Balendran, "Some observations on elastic properties of plain concrete". Cement and Concrete Research, 16 (3) (1986) 314-24.
- [68] Masahiro Suzuki a, Mohammed Seddik Meddah b,□, Ryoichi Sato b, Use of porous ceramicwaste aggregates for internal curing of high-performance concrete, Cement and Concrete Research 39 (2009) 373–381
- [69] P. Zia, S. Ahmad, M. Leming, High-Performance Concrete: A state-of-Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1991, 251 p, (SHRP-C/FR91-103; PB92-130087).
- [70] K. Takada, K. van Breugel, E.A.B. Koenders, N. Kaptijin, Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete, Proceeding of Int. Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, JCI Ed, E.I. Tazawa, Hiroshima, Japan, 1999, pp. 221–230.
- [71] K. Kohno, T. Okamoto, Y. Isikawa, T. Sibata, H. Mori, "Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete", Cement and Concrete Research 29 (2) (1999) 611–614.
- [72] F. Collins, J.G. Sanjayan, "Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate", Cement and Concrete Research 29 (4) (1999) 607–610.
- [73] A. Bentur, S. Igarashi, K. Kovler, "Prevention of autogenous shrinkage in high strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates", Cement and Concrete Research 31 (11) (2001) 1587–1591.
- [74] S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur, "Influence of wet lightweight aggregate on mechanical properties of concrete at early ages", Materials Structure 35 (2002) 97–101.
- [75] Y. Kitsutaka, M. Tamura, A. Iihoshi, K. Goto, "Early-age shrinkage properties of high strength lightweight aerated concrete", in: H. Mihashi, F. Wittmann (Eds.), Proceeding of



International Workshop Control of Cracking in Early-Age Concrete, Swets & Zeitlinger B.V. Publ., Lisse, The Netherlands, 2002, pp. 213–218.

[76] P. Schwesinger, G. Sickert, Reducing shrinkage in HPC by internal curing by using pre-soaked LWA, in: H. Mihashi, F. Wittmann (Eds.), Proceeding of International Workshop Control of Cracking in Early-Age Concrete, Swets & Zeitlinger B.V. Publ., Lisse, The Netherlands, 2002, pp. 333–338.

[77] S. Zhutovsky, K. Kovler, A. Bentur, “Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete”, *Cement & Concrete Composites* 26 (5) (2004) 499–507.

[78] D.P. Bentz, K.A. Snyder, “Protected paste volume in concrete: extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregates”, *Cement and Concrete Research* 29 (11) (1999) 1863–1867.

[79] K. Kovler, Advanced methods of concrete curing to mitigate autogenous shrinkage and cracking at early age, Int. Seminar on Durability and Lifecycle Evaluation of Concrete Structures, Hiroshima, Japan, Sept. 13 2004, pp. 3–12.

[80] Shi-Cong Koua, Chi-Sun Poon, Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cement & Concrete Composites* 37 (2013) 12–19.

[81] Gonzalez, Andreu; Etxeberria, Miren, “Properties of high performance concrete made with recycled ceramic fine and coarse aggregates”

[82] Retracción plástica. Consulta en 19 de Enero de 2014.

<http://www.polpaicoconexion.cl/uploads/docXobra/pdf200711213221.pdf>

[83] Erika Holt, “Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages” *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 464– 472.

[84] Kwan WaiHoe, Ramli Mahyuddin, Kam KennJhun, Sulieman MohdZailan. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr Build Mater* 2012;26:565–73.



- [85] Madandoust R, Ghavidal R, Nariman-Zodeh N. Evolutionary design of generalized GMDH-type neural network for prediction of compressive strength using UPV. *Comput Mater Sci* 2010;49:556–67.
- [86] Alejandro Chausse Sanjuán (director, Miren Etxeberria) Utilización de agua marina en la fabricación de hormigones convencionales y reciclados, tesina de grado, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2013.
- [87] Jesús Manuel Fernández Vecino (director, Miren Etxeberria), Caracterización del hormigón fabricado con árido reciclado para aplicaciones portuarias, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2013.
- [88] Ilker Bekir Topçu, Turhan Bilir, Experimental investigation of drying shrinkage cracking of composite, *Materials and Design* 31 (2010) 4088–4097.
- [89] Claudio Javier Zega, Ángel Antonio Di Maio, “Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements” *Waste Management* 31 (2011) 2336-2340.
- [90] Wei-lun Wang, Shi-Cong Kou, Feng Xing, “Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100 % recycled coarse aggregates”, *Construction and Building Materials* 48 (2013) 187-193.
- [91] KOU Shi-Cong, ZHAN Bao-jian, POON Chi-Sun, Use of a CO₂ Curing Step to Improve the Properties of Concrete Prepared with Recycled Aggregates, *Cement & Concrete Composites* 45 (2014) 22–28.
- [92] J.P. Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*. Spoon Press (2003).
- [93] P. Langford, J. Broomfield, Monitoring the Corrosion of Reinforcing Steel. *Construction Repair*, Vol. 1, No. 2, (May 1987) 32-36.

